

منتدى اقرأ الثقافي

دليل المهندس الميكانيكي

المرجع في قوانين الميكانيك والمعادلات لمهندسي القدرة والإنتاج والتصميم مع أهم الجداول في متناول يدك



إعداد المهندس عبد الكريم البيكو

لتحميل انواع الكتب راجع: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

پدای داتلود کتابهای مختلف مراجعه: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

پژدهبازاندنی چۆردها کتیب:سەردانی: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

www.iqra.ahlamontada.com



www.iqra.ahlamontada.com

للکتاب (کوردی , عربی , فارسی)

- الطبعة الأولى 2004
 - جميع الحقوق محفوظة
 - الناشر: شعاع للنشر والعلوم
- حارة الرباط 2 - المنطقة 12 - حي السبيل 2
تلفاكس : 00963 (21) 2643545
هاتف : 00963 (21) 2643546
سورية - حلب
ص.ب 7875

لمزيد من المعلومات ولشراء كتب الدار مباشرة على الانترنت

<http://www.raypub.com>

يرجى زيارة موقعنا

nabilray@scs-net.org

البريد الالكتروني للقراء:

raymail@raypub.com

البريد الالكتروني لدور النشر والموزعين:

دليل المهندس الميكانيكي

إعداد المهندس عبد الكريم البيكو

الإهداء

إلى روح أبي الطاهرة وأمي المكافحة
أخوتي، أخواتي، أقربائي، أصدقائي
إلى كل من يؤمن بحتمية نهوض هذه الأمة

عبد الكريم البيكر

مقدمة

يحتوي هذا الدليل على أكثر من 2000 معادلة يحتاجها المهندسون الميكانيكيون لتساعدهم على التصميم وحل المسائل والمشاكل التي يواجهونها، وتفيد هذه المعادلات مهندسي التصميم ومهندسي الإنتاج ومهندسي الطاقة والعديد من الاختصاصات المختلفة لمهندسي الميكانيك.

لقد تم إدراج المعادلات في هذا الدليل وفق أحد عشر بابا من أبواب الهندسة الميكانيكية: عوامل التحويل بين جملتي الواحدات USCS و IS (الجملة الدولية)، معادلات الستاتيك والتحرك، معادلات الإجهادات في العناصر الميكانيكية، المحاور ومعادلات المحاور، عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية، معادلات تشغيل المعادن، معادلات التدفئة والتهوية والتكييف، معادلات الترموديناميك، معادلات هندسة الطاقة، معادلات هندسة الموائع، الاهتزازات.

لقد أوردنا شرحا للمتغيرات الداخلة في المعادلة عقب كل معادلة، وأعطيت معظم المعادلات وفق نظامي الواحدات USCS و IS، حيث أوردنا مختلف عوامل التحويل بين هذين النظامين في الفصل الأول.

لقد اعتمدت في تجميع هذا الكتاب على خبرتي العملية والمجالات التي أراها هامة أكثر، وتساعد المهندس في حياته العملية وفي تطبيق معادلات الهندسة الميكانيكية.

يستطيع مهندسو الميكانيك - بصرف النظر عن مدى احترافهم - استخدام هذه المعادلات لتساعدهم على إتمام أعمالهم على أكمل وجه، مثل تصميم الآلات - التقدير - الاختبار - التعليمات التقنية - التصنيف - الإصلاح إلخ ...

لإيجاد المعادلة المناسبة للحالة التي تواجهها أخي المهندس ابدأ أولا بالفهرس لتحديد

المجال العام للمعادلة، ثم اقرأ النص المكتوب بجانب المعادلة والذي يعطي معلومات عنها، قم بتطبيق المعادلة واستخدم النتائج.

حتى تتمكن من استخدام هذه المعادلات وفق جملة الواحدات التي تناسبك ننصحك بإنشاء قائمة بعوامل التحويل التي تستخدمها بكثرة، ثم اختر الواحدات التي تريد تحويلها من الجملة المستخدمة في المعادلة إلى الجملة التي تريدها، أنشئ جدولاً بهذه الواحدات واستخدمه كما كان ذلك ضرورياً.

انتبه عزيزي المهندس إلى المعادلات التي تحتوي ثوابت عددية، قم بتحويل هذه الثوابت إلى الجملة التي تريدها، أو كما يسمونها بالنتيجة وفق الجملة الموضوعية فيها المعادلة ثم حول النتيجة إلى جملة الواحدات التي تريد.

عبد الكريم بيكو

حلب 2004/2/15

الثقافي

1

عوامل التحويل إلى الواحدات
في النظام الدولي

منتدى
إقرأ الثقافي



الجدول 1.1

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
1.233489 E + 03	cubic meter, m ³	acre-foot acre . ft
4.046873 E + 03	square meter, m ²	acre
1.000000 E - 10	meter, m	angstrom, Å
1.013250 E + 05	pascal, Pa	atmosphere, atm (standard)
9.806650 E + 04	pascal, Pa	atmosphere, atm (technical = 1 kgf/cm ²)
1.000000 E + 0.5	pascal, Pa	bar
1.589873 E - 01	cubic meter, m ³	barrel (for petroleum, 42 gal)
2.359737 E - 03	cubic meter, m ³	board foot, board ft
1.05587 E + 03	joule, J	British thermal unit, Btu (mean)
1.442279 E - 01	watt per meter-kelvin, W/(m . K)	British thermal unit, Btu (International Table) . in/(h) (ft ²) (°F) (k, thermal conductivity)
2.930711 E - 01	watt, W	British thermal unit, Btu (International Table)/h
5.678263 E + 00	watt per square meter-kelvin, W/(m ² . K)	British thermal unit, Btu (International Table)/(h) (ft ²) (°F) (C, thermal conductance)
2.326000 E + 03	joule per kilogram, J/kg	British thermal unit, Btu (International Table)/lb
4.186800 E + 03	joule per kilogram-kelvin, J/(kg . K)	British thermal unit, Btu (International Table)/(lb) (°F) (c, heat capacity)
3.725895 E + 04	joule per cubic meter, J/m ³	British thermal unit per cubic foot, Btu (International Table)/ft ³
3.523907 E - 02	cubic meter, m ³	bushel (U.S.)

لضرب بـ	إلى	للتحويل من
4.19002 E + 00	joule, J	calorie (mean)
1.550003 E + 03	candela per square meter, cd/m ²	candela per square inch, cd/in ²
1.33322 E + 03	pascal, Pa	centimeter, cm. of mercury (0°C)
9.80638 E + 01	pascal, Pa	centimeter, cm. of water (4°C)
2.011684 E + 01	meter, m	chain
5.067075 E - 10	square meter, m ²	circular mil
8.640000 E + 04	second, s	day
8.616409 E + 04	second, s	day (sidereal)
1.745329 E - 02	radian, rad	degree (angle)
$T_K = t_C + 273.15$	kelvin, K	degree Celsius
$t_C = (t_F - 32)/1.8$	degree Celsius, °C	degree Fahrenheit
$T_K = (t_F + 459.67)/1.8$	kelvin, K	degree Fahrenheit
$T_K = T_R/1.8$	kelvin, K	degree Rankine
1.761102 E - 01	kelvin-square meter per watt, K · m ² /W	(°F) (h) (ft ²)/Btu (International Table) (R, thermal resistance)
6.933471 E + 00	kelvin-meter per watt, K · m/W	(°F) (h) (ft ²)[Btu (International Table) · in] (thermal resistivity)
1.000000 E - 05	newton, N	dyne, dyn
1.828804 E + 00	meter, m	fathom
3.048000 E - 01	meter, m	foot, ft
3.048006 E - 01	meter, m	foot, ft (U.S. survey)
2.98898 E + 03	pascal, Pa	foot, ft, of water (39.2°F) (pressure)
9.290304 E - 02	square meter, m ²	square foot, ft ²

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
2.580640 E - 05	square meter per second, m ² /s	square foot per hour, ft ² /h (thermal diffusivity)
9.290304 E - 02	square meter per second, m ² /s	square foot per second, ft ² /s
2.831685 E - 02	cubic meter, m ³	cubic foot, ft ³ (volume or section modulus)
4.719474 E - 04	cubic meter per second, m ³ /s	cubic foot per minute, ft ³ /min
2.831685 E - 02	cubic meter per second, m ³ /s	cubic foot per second, ft ³ /s
8.630975 E - 03	meter to fourth power, m ⁴	foot to the fourth power, ft ⁴ (area moment of inertia)
5.080000 E - 03	meter per second, m/s	foot per minute, ft/min
3.048000 E - 01	meter per second, m/s	foot per second, ft/s
3.048000 E - 01	meter per second squared, m/s ²	foot per second squared, ft/s ²
1.076391 E + 01	lux, lx	footcandle, fc
3.426259 E + 00	candela per square meter, cd/m ²	foot-lambert, ft . L
1.355818 E + 00	joule, J	foot-pound force, ft . lbf
2.259697 E - 02	watt, W	foot-pound force per minute, ft . lbf/min
1.355818 E + 00	watt, W	foot-pound force per second, ft . lbf/s
4.214011 E - 02	joule, J	foot poundal, ft poundal
9.806650 E + 00	meter per second squared, m/s ²	free fall, standard g
4.546090 E - 03	cubic meter, m ³	gallon, gal (Canadian liquid)
4.546092 E - 03	cubic meter, m ³	gallon, gal (U.K. liquid)
4.404884 E - 03	cubic meter, m ³	gallon, gal (U.S. dry)

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
3.785412 E - 03	cubic meter, m ³	gallon, gal (U.S. liquid)
4.381264 E - 08	cubic meter per second, m ³ /s	gallon, gal (U.S. liquid) per day
6.309020 E - 05	cubic meter per second, m ³ /s	gallon, gal (U.S. liquid) per minute
9.000000 E - 01	degree (angular)	grad
1.570796 E - 02	radian, rad	grad
6.479891 E - 05	kilogram, kg	grain, gr
1.000000† E - 03	kilogram, kg	gram, g
1.000000† E + 04	square meter, m ²	hectare, ha
7.456999 E + 02	watt, W	horsepower, hp (550 ft . lbf/s)
9.80950 E + 03	watt, W	horsepower, hp (boiler)
7.460000 E + 02	watt, W	horsepower, hp (electric)
7.46043 E + 02	watt, W	horsepower, hp (water)
7.4570 E + 02	watt, W	horsepower, hp (U.K.)
3.600000 E + 03	second, s	hour, h
3.590170 E + 03	second, s	hour, h (sidereal)
2.540000 E - 02	meter, m	inch, in
3.38638 E + 03	pascal, Pa	inch of mercury, inHg (32°F) (perssure)
2.4884 E + 02	pascal, Pa	inch of water, inH ₂ O (60°F) (perssure)
3.37685 E + 03		inch of mercury, in Hg (60°F) (pressure)
6.451600 E - 04	square meter, m ²	square inch, in ²
6.451600 E - 05	cubic meter, m ³	cubic inch, in ³ (volume or section modulus)

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
4.162314 E - 07	meter to fourth power, m ⁴	inch to the fourth power, in ⁴ (area moment of inertia)
2.540000 E - 02	meter per second, m/s	inch per second, in/s
$t_C = T_K - 273.15$	degree Celsius, °C	kelvin, K
9.806650 E + 00	newton, N	kilogram force, kgf
9.806650 E + 00	newton-meter, N . m	kilogram force-meter, kg . m
9.806650 E + 00	kilogram, kg	kilogram force-second squared per meter, kgf . s ² /m (mass)
9.806650 E + 04	pascal, Pa	kilogram force per square centimeter, kgf/cm ²
9.806650 E + 00	pascal, Pa	kilogram force per square meter, kgf/m ²
9.806650 E + 06	pascal, Pa	kilogram force per square millimeter, kgf/mm ²
2.777778 E - 01	meter per second, m/s	kilometer per hour, km/h
3.600000 E + 06	joule, J	kilowatthour, kWh
4.448222 E + 03	newton, N	kip (1000 lbf)
6.894757 E + 06	pascal, Pa	kip per square inch, kip/in ² or ksi
5.144444 E - 01	meter per second, m/s	knot, kn (international)
3.183099 E + 03	candela per square meter, cd/m ²	lambert, L
1.000000 E - 03	cubic meter, m ³	liter
1.000000 E - 08	weber, Wb	maxwell
1.000000 E + 00	siemens, S	mho
2.540000 E - 08	meter, m	microinch, μ in
1.000000 E - 06	meter, m	micrometer, μ m

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
2.540000 E - 05	meter, m	miles, mi
1.609344 E + 03	meter, m	mile, mi (international)
1.609347 E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. statute)
1.852000 E + 03	meter, m	mile, mi (international nautical)
1.852000 E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. nautical)
2.589988 E + 06	square meter, m ²	square mile, mi ² (international)
2.589998 E + 06	square meter, m ²	square mile, mi ² (U.S. statute)
4.470400 E - 01	meter per second, m/s	mile per hour, mi/h (international)
1.609344 E + 00	kilometer per hour, km/h	mile per hour, mi/h (international)
1.000000 E + 02	pascal, Pa	millibar, mbar
1.33322 E + 02	pascal, Pa	millimeter of mercury, mmHg (0°C)
2.908882 E - 04	radian, rad	minute (angle)
6.000000 E + 01	second, s	minute, min
5.983617 E + 01	second, s	minute (sidereal)
2.834952 E - 02	kilogram, kg	ounce, oz (avoirdupois)
3.110348 E - 02	kilogram, kg	ounce oz (troy or apothecary)
2.841307 E - 05	cubic meter, m ³	ounce, oz (U.K. fluid)
2.957353 E - 05	cubic meter, m ³	ounce, oz (U.S. fluid)
2.780139 E - 01	newton, N	ounce force, ozf
7.061552 E - 03	newton-meter, N.m	ounce force-inch, ozf . in
3.051517 E - 01	kilogram per square meter, kg/m ²	ounce per square foot, oz (avoirdupois)/ft ²
3.390575 E - 02	kilogram per square meter, kg/m ²	ounce per square yard, oz (avoirdupois)/yd ²

نضرب —	إلى	للتحويل من
5.72135 E - 11	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm (0°C)
5.74525 E - 11	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm (23°C)
1.45322 E - 12	kilogram per pascal-second-meter, Kg/(Pa . s . m)	perm-inch, perm. in (0°C)
1.45929 E - 12	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm-inch, perm . in (23°C)
5.506105 E - 04	cubic meter, m ³	pint, pt (U.S. dry)
4.731765 E - 04	cubic meter, m ³	pint, pt (U.S. liquid)
1.000000 E - 01	pascal-second, Pa . s	poise, P (absolute viscosity)
4.535924 E - 01	kilogram, kg	pound, lb (avoirdupois)
3.732417 E - 01	kilogram, kg	pound, lb (troy or apothecary)
2.926397 E - 04	kilogram-square meter, kg . m ²	pound-square inch, lb . in ² (moment of inertia)
1.488164 E + 00	pascal-second, Pa . s	pound per foot-second, lb/ft . s
4.882428 E + 00	kilogram per square meter, kg/m ²	pound per square foot, lb/ft ²
1.601846 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m ³	pound per cubic foot, lb/ft ³
9.977633 E + 01	kilogram per cubic meter, kg/m ³	pound per gallon, lb/gal (U.K. liquid)
1.198264 E + 02	kilogram per cubic meter, kg/m ³	pound per gallon, lb/gal (U.S. liquid)
1.259979 E - 04	kilogram per second, kg/s	pound per hour, lb/h
2.767990 E + 04	kilogram per cubic meter, kg/m ³	pound per cubic inch, lb/in ³

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
7.559873 E - 03	kilogram per second, kg/s	pound per minute, lb/min
4.535924 E - 01	kilogram per second, kg/s	pound per second, lb/s
5.932764 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m ³	pound per cubic yard, lb/yd ³
1.382550 E - 01	newton, N	poundal
4.448222 E + 00	newton, N	pound force, lbf
1.355818 E + 00	newton-meter, N . m	pound force-foot, lbf . ft
1.459390 E + 01	newton per meter, N/m	pound force per foot, lbf/ft
4.788026 E + 01	pascal, Pa	pound force per square foot, lbf/ft ²
1.751268 E + 02	newton per meter, N/m	pound force per inch, lbf/in
6.894757 E + 03	pascal, Pa	pound force per square inch, lbf/in ² (psi)
1.101221 E - 03	cubic meter, m ³	quart, qt (U.S. dry)
9.463529 E - 04	cubic meter, m ³	quart, qt (U.S. liquid)
5.029210 E + 00	meter, m	rod
4.848137 E - 06	radian, rad	second (angle)
9.972696 E - 01	second, s	second (sidereal)
9.290304 E + 00	square meter, m ²	square (100 ft ²)
2.916667 E - 02	kilogram, kg	ton (assay)
1.016047 E + 03	kilogram, kg	ton (long, 2240 lb)
1.000000 E + 03	kilogram, kg	ton (metric), t
3.516800 E + 03	watt, W	ton (refrigeration)
2.831685 E + 00	cubic meter, m ³	ton (register)
9.071847 E + 02	kilogram, kg	ton (short 2000 lb)
1.328939 E + 03	kilogram per cubic meter, kg/m ³	ton (long) per cubic yard, ton/yd ³

للتحويل من	إلى	نضرب بـ
ton (short) per cubic yard, ton/yd ³	kilogram per cubic meter, kg/m ³	1.186553 E + 03
ton force (2000 lbf)	newton, N	8.896444 E + 03
tonne, t	kilogram, kg	1.000000 E + 03
watt hour, Wh	joule, J	3.600000 E + 03
yard, yd	meter, m	9.144000 E - 01
square yard, yd ²	square meter, m ²	8.361274 E - 01
cubic yard, yd ³	cubic meter, m ³	7.645549 E - 01
year (365 days), yr	second, s	3.153600 E + 07
year (sidereal)	second, s	3.155815 E + 07

2

معادلات الستاتيك والتحرك

معادلات الحركة

رموز واصطلاحات

$$t = \text{الزمن، s.}$$

$$s = \text{الإزاحة الخطية، ft (m).}$$

$$v = \text{السرعة الخطية، ft/s (m/s).}$$

$$V_0 = \text{السرعة الخطية عند اللحظة الصفرية (مبدأ الزمن)، ft/s (m/s).}$$

$$a = \text{التسارع الخطي، ft/s}^2 \text{ (m/s}^2\text{).}$$

$$\theta = \text{الإزاحة الزاوية، rad.}$$

$$\omega = \text{السرعة الزاوية، rad/s.}$$

$$\omega_0 = \text{السرعة الزاوية عند اللحظة الصفرية (مبدأ الزمن)، rad/s.}$$

$$\alpha = \text{التسارع الزاوي، rad/s}^2.$$

$$w = \text{كتلة الجسم، lbm (kg mass).}$$

$$f = \text{قوة التسارع، lb (N).}$$

$$g_c = \text{عامل التحويل} = 32.2 \text{ (ft)/(lbf.s}^2\text{) (lbm) (9.81 m/s}^2\text{)}$$

متغير ω	متغير v	ثابت ω	ثابت v
$\omega = d\theta/dt$	$v = ds/dt$	$\omega = \theta/t$	$v = s/t$
متغير α	متغير a	ثابت α	ثابت a
$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	$\alpha = \omega_0 + \alpha t$	$v = V_0 + at$
$\omega = \int \alpha dt$	$v = \int a dt$	$\theta = \omega_0 t + 1/2 \alpha t^2$	$s = V_0 t + 1/2 at^2$
$\theta = \int \omega dt$	$s = \int v dt$	$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2\alpha\theta}$	$v = \sqrt{v_0^2 + 2as}$

ومن أجل تسارع نظامي:

$$f = \frac{W}{g_c} a$$

الستاتيك

نقول عن أي نظام قوة في الفضاء أنه متوازن إذا كانت محصلة القوة معدومة ومحصلة العزم معدومة أيضاً. ويعبر عن ذلك كما يلي:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= \sum F_y = \sum F_z = 0 \\ \sum M_x &= \sum M_y = \sum M_z = 0\end{aligned}$$

حيث:

F = القوة، lb (N).

M = العزم، ft.lb (N.m).

x, y, z = محاور الإحداثيات.

عزم العطالة

عزم العطالة: يُعطى عزم العطالة I بالنسبة لمحور معين بالمعادلتين التاليتين:

$$I = \int y^2 dm \quad \text{lb.ft}^2 \text{ (Kg.m}^2\text{)} \quad \text{للأجسام المصمتة}$$

$$I = \int y^2 dA \quad \text{ft}^4 \text{ (m}^4\text{)} \quad \text{للمساحات المستوية}$$

حيث:

y = المسافة بين عناصر الكتلة أو المساحة والمحور المرجعي، ft (m).

dm = تفاضل الكتلة، lb (Kg).

dA = تفاضل المساحة، ft^2 (m^2).

نصف قطر الدوران: يعبر عن نصف قطر الدوران بالطول k ، ft (m)، والممثل بالعلاقة:

$$I = \int y^2 dm = K^2 m \quad \text{للأجسام الصلبة}$$

$$I = \int y^2 dA = K^2 A \quad \text{للمساحة المستوية}$$

حيث:

m = الكتلة الكلية، lb (Kg).

A = المساحة، ft^2 (m^2).

عزم العطالة ونصف قطر الدوران حول المحاور المتوازية: يُعطى عزم العطالة حول أي محور بالعلاقة التالية:

$$I = I_{cg} + a^2 m \quad \text{للأجسام الصلبة}$$

$$I = I_{cg} + a^2 A \quad \text{للمساحة المستوية}$$

حيث: I_{cg} = عزم العطالة للأجسام الصلبة ($lb \cdot ft^2$) ($Kg \cdot m^2$)، أو المساحة (ft^4) (m^4)، حول محور مواز للمحور المرجعي ومار من مركز الثقل.

a = المسافة بين المحور المرجعي والمحور المار من مركز الثقل (ft) (m).

وبالتالي يمكننا أن نكتب:

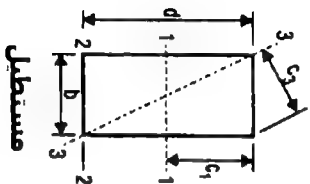
$$K^2 = K_{cg}^2 + a^2$$

حيث: K_{cg} = نصف قطر الدوران لمركز الثقل، (ft) (m).

عزم العطالة القطبي: يُعطى عزم العطالة القطبي للمساحة ما حول محور عمودي (أو متعامد) على تلك المساحة بالعلاقة:

$$J = I_1 + I_2 \quad \text{ft}^4 (\text{m}^4)$$

حيث يمثل I_1 و I_2 عزمي العطالة حول أي محورين متعامدين واقعين في مستوي تلك المساحة ويقطعان المحور العمودي على المستوي.



$\lambda = 100$

$$c_1 = \sigma/2$$

$$C_2 = 0$$

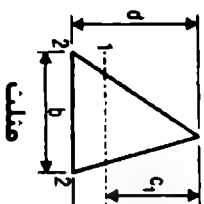
$$C_3 = \frac{C_2 + C_1}{2}$$

5-
H
8/8

$$r = \frac{a}{\sqrt{12}}$$

$$I_3 = \frac{\omega}{\sqrt{6\sigma^2 + \sigma^2}}$$

24



$$\frac{y}{x}$$

$$C_1 = \frac{2\theta}{\pi}$$

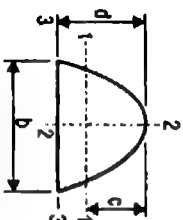
—

$$\frac{1}{2} = \frac{6d^3}{12}$$

$$S = \frac{b^2}{a}$$

$$r_1 = \frac{d}{\sqrt{11}}$$

$$S = \frac{b^2}{a}$$



$$A = \frac{2}{3}$$

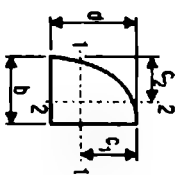
5/15/20

17

$$I_2 = \frac{b^3}{3c}$$

$$\frac{1}{10} \approx 0.1$$

$$\frac{1}{10} \approx 0.1$$



$$\frac{2}{3}A = Y$$

5/5

62 x

$$I_1 = \frac{1}{0.72}$$

2

$$I_1 = \frac{1}{0.72}$$

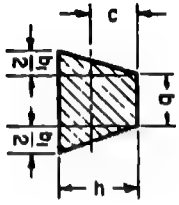
قسط ۱۷

ಪ್ರಜ್ಞಾ ಪೀಠ

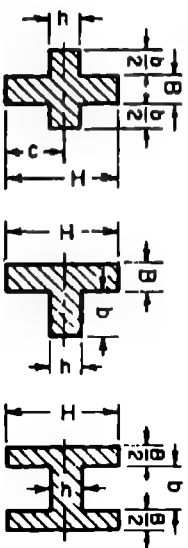
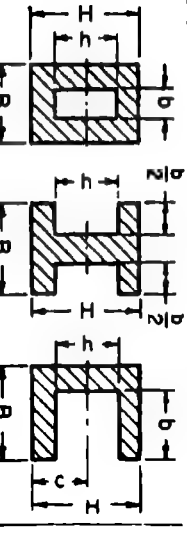
Jubatus

مقاله

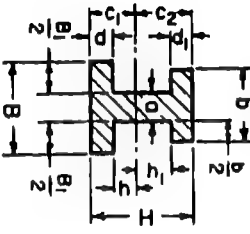
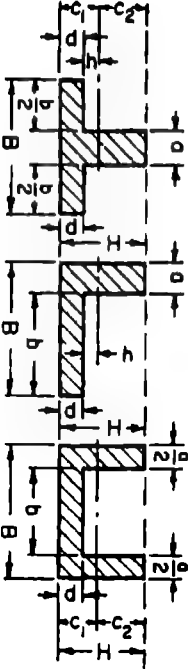
المجلد 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة

المقطع	عزم العطالة	معايير المقطع	نصف قطر الدوران
<p>مقطع مستأوى الاضلاع</p> <p>A = المساحة</p> <p>R = قطر الدائرة الخارجية</p> <p>r = والمرة بزاوية</p> <p>قطر الدائرة الداخلية المقاسة</p> <p>n = عدد الاضلاع</p> <p>a = طول الضلع</p>	$I = \frac{A}{24} (6R^2 - a^2)$ $= \frac{A}{48} (12r^2 + a^2)$ $= \frac{AR^2}{4} \text{ (approx)}$	$\frac{I}{c} = \frac{I}{r}$ $= \frac{I}{R \cos \frac{180^\circ}{n}}$ $= \frac{AR}{4} \text{ (approx)}$	$\sqrt{\frac{6R^2 - a^2}{24}} \approx \frac{R}{2}$ $\sqrt{\frac{12r^2 + a^2}{48}}$
	$I = \frac{6b^2 + 6bh_1 + b_1^2}{36(2b + b_1)} h^3$ $c = \frac{1}{3} \frac{3b + 2b_1}{2b + b_1} h$	$I_c = \frac{6b^2 + 6bh_1 + b_1^2}{12(3b + 2b_1)} h^3$	$\frac{h\sqrt{12b^2 + 12bh_1 + 2b_1^2}}{6(2b + b_1)}$

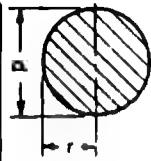
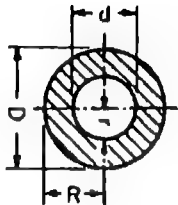
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع

	$I = \frac{BH^3 + bh^3}{12}$ $\frac{I}{c} = \frac{BH^3 + bh^3}{6H}$	$\sqrt{\frac{BH^3 + bh^3}{12(BH + bh)}}$
	$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$ $\frac{I}{c} = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	$\sqrt{\frac{BH^3 - bh^3}{12(BH - bh)}}$

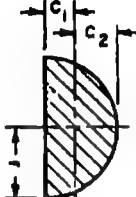
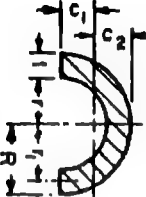
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

المقطع	عزم العطالة ومعابر المقطع	نصف قطر الدوران
	$I = \frac{1}{12}(Bc_1^3 - B_1h^3 + bct^3 - bh_1^3)$ $c_1 = \frac{1}{2} \frac{aH^3 + B_1d^3 + bdi(2H - d_1)}{aH + B_1d + bdi}$	$\sqrt{\frac{I}{(Bd + bd_1) + a(h + h_1)}}$
	$I = \frac{1}{12}(Bc_1^3 - b_1h^3 + ac_1^3)$ $c_1 = \frac{1}{2} \frac{aH^3 + bd^3 + bdi}{aH + B_1d + bdi}$ $c_2 = H - c_1$ $r = \sqrt{\frac{I}{Bd + a(H - d)}}$	

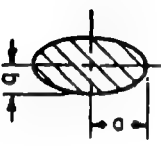
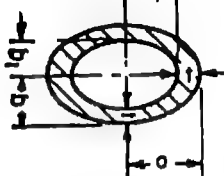
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة / تابع

المقطع	عدم العطالة	معايير المقطع	نصف قطر الدوران
	$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{A}{4} r^2$ $= 0.0549 \text{ (approx)}$	$\frac{I}{c} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{A}{4} r$ $= 0.1 d^2 \text{ (approx)}$	$\frac{r}{2} = \frac{d}{4}$
 <p> $d_m = \frac{1}{2}(D + d)$ $\delta = \frac{1}{2}(D - d)$ </p>	$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$ $= \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$ $= \frac{1}{4} A (R^2 + r^2)$ $= 0.05 (D^4 - d^4)$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$ $= \frac{\pi}{4} \frac{R^4 - r^4}{R}$ $= 0.04 d_m^2 \text{ (approx)}$ <p>when $\frac{\delta}{d_m}$ is very small</p>	$\frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{2} = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4}$

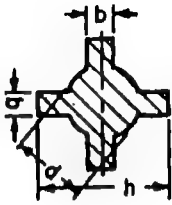
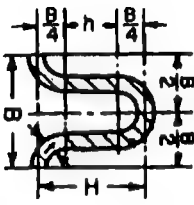
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

المقطع	عدم العطالة	معامل المقطع	نصف قطر الدوران
	$I = r^4 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi} \right)$ $= 0.1098r^4$	$\frac{I}{a} = 0.1908r^3$ $\frac{I}{a} = 0.2587r^3$ $a = 0.4244r$	$\frac{\sqrt{9\pi^3 - 64}}{6\pi} r = 0.264r$
	$I = 0.1098(R^4 - r^4)$ $- \frac{0.283Rr^3(R - r)}{R + r}$ $= 0.34r^3 \text{ (approx)}$ <p>when $\frac{r}{R}$ is very small</p>	$a = \frac{4}{3\pi} \frac{R^3 + Rr + r^3}{R + r}$ $a = R - a$	$\sqrt{\frac{2I}{\pi(R^3 - r^3)}}$ $= 0.31r \text{ (approx)}$

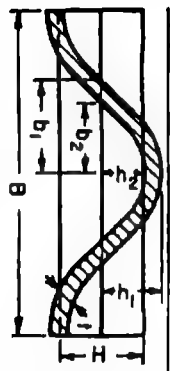
المجلد 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

	$I = \frac{\pi a^3 b}{4} = 0.7854 a^3 b$	$\frac{I}{c} = \frac{\pi a^3 b}{4} = 0.7854 a^3 b$	$\frac{a}{2}$
	$I = \frac{\pi}{4} (a^3 b - a_1^3 b_1)$ $= \frac{\pi}{4} a^2 (a + 3b) \quad (\text{approx})$	$\frac{I}{c} = \frac{\pi}{4} a (a + 3b) \quad (\text{approx})$	$\frac{I}{\sqrt{(\pi a b - \pi a_1 b_1)}} = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a + 3b}{a + b}} \quad (\text{approx})$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة / تابع


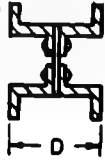







نصف قطر الدوران	عزم العطالة ومعايير المقطع	المقطع
$\sqrt{\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4} + 2b(h-d)}}$ <p>(approx)</p>	$I = \frac{1}{12} \left[\frac{3\pi}{16} d^4 + b(h^3 - d^3) + b^2(h-d) \right]$ $\frac{I}{c} = \frac{1}{6h} \left[\frac{3\pi}{16} d^4 + b(h^3 + d^3) + b^2(h-d) \right]$	
$\sqrt{2 \left(\frac{\pi B^4}{4} + h \right) \epsilon}$	$I = \frac{\epsilon}{4} \left(\frac{\pi B^3}{16} + B^2h + \frac{\pi B h^3}{2} + \frac{2}{3} h^3 \right)$ $h = H - \frac{1}{4} B$ $\frac{I}{c} = \frac{2I}{H + \epsilon}$	

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

	$I = \frac{64}{105} (b_1 h_1^3 - b_2 h_2^3), \text{ where}$ $h_1 = \frac{1}{2}(H + t) \quad \quad b_1 = \frac{1}{2}(B + 2.6t)$ $h_2 = \frac{1}{2}(H - t) \quad \quad b_2 = \frac{1}{2}(B - 2.6t)$ $\frac{I}{e} = \frac{2I}{B + t}$	$r = \sqrt{\frac{3I}{(2B + 5.2H)}}$
---	--	-------------------------------------

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

القيم التقريبية لنصف قطر الدوران الأصغري

	Phoenix column		Carnegie Z-bar column		I-beam		Channel		Deck beam
$r = 0.3636D$		$0.295D$		$D/4.58$		$D/3.54$		$D/6$	
	T-beam		Angle Equal legs		Angle Unequal legs		Cross		
$r = D/4.74$		$D/5$		$BD/2.6(B + D)$		$D/4.74$			

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

التحريك

طاقة الجسم الصلب

يملك الجسم الصلب طاقة حركية تنتج عن حركته:

$$\text{الطاقة الحركية} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{للحركة الانسحابية}$$

$$\text{الطاقة الحركية} = \frac{1}{2} I_0 \omega^2 \quad \text{للحركة الدورانية}$$

حيث:

$$m = \text{الكتلة، lb (Kg)}$$

$$I_0 = \text{عزم العطالة حول محاور الدوران، lb.ft}^2 \text{ (Kg.m}^2\text{)}$$

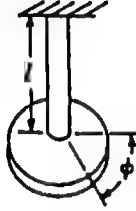
$$v = \text{السرعة، ft/s (m/s)}$$

$$\omega = \text{السرعة الزاوية، rad/s}$$

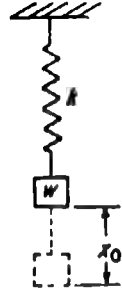
ويملك الجسم الصلب طاقة كامنة تكون ناتجة عن وضعه، والتي تعني، تلك الطاقة القادرة على القيام بعمل.

الاهتزازات الحرة للأنظمة وحيدة درجة الحرية

إذا أزيح نظام مرن عن وضع توازنه بقوة، فستصبح قوى المرونة للنظام في الوضع المزاح غير مكافئة للحمل، وبالتالي سينشأ لدينا اهتزاز (الشكل 2.1).



الشكل 2.2



الشكل 2.1

رموز واصطلاحات

K = ثابت صلابة النابض للنظام، lb/ft (N/m).

$\frac{dx}{dt} = v$ = السرعة، ft/s (m/s).

v_0 = السرعة الابتدائية، ft/s (m/s).

t = الزمن، s.

W = الوزن (مع إهمال وزن النابض بالنسبة للوزن W) lb (Kg).

f = تردد الاهتزاز، s^{-1} .

p = دور الاهتزاز = $\sqrt{Kg_c/W}$ ، s^{-1} .

t = زمن هزة كاملة واحدة، s.

$\omega = P$ ، في حالة الدوران، rad/s.

$g_c = 32.2 (ft)/(lb \cdot s^2) = 9.81 m/s^2$.

x = مقدار إزاحة W عن وضع توازنه، $ft(m)$.

x_0 = الإزاحة الابتدائية عن وضع التوازن، $ft(m)$.

$$\frac{W}{g_c} \frac{d^2 x}{dt^2} - kx = 0$$

$$t = \frac{2\pi}{p} \quad f = \frac{1}{t} = \frac{p}{2\pi} \quad p = 2\pi f \quad p = \frac{2\pi}{t}$$

ونأخذ معادلة الحركة الشكل التالي:

$$x = x_0 \cos pt + \frac{v_0}{p} \sin pt$$

التردد الطبيعي

إذا كانت ∂_{ST} تعبر عن إزاحة النابض الناتجة عن الوزن W ، عندها $\partial_{ST} = \frac{W}{K}$ وعدد الاهتزازات الحرة خلال 2π ثانية = $\omega_n = \sqrt{\frac{g_c}{\partial_{ST}}}$ وبالتالي سيكون التردد الطبيعي:

$$f_n = 3.14 \sqrt{\frac{1}{\partial_{ST}}} \text{ Hz}$$

اهتزاز القتل

إذا ثبتنا قرصاً، كما في الشكل 2.2، بفضيب مرن وأدركنا القرص بزاوية ابتدائية، عندها سيقوم هذا النظام المرن والمؤلف من القرص والفضيب باهتزاز قتل.

دعنا نفترض:

ϕ = زاوية القتل للمحور في أي لحظة، rad.

K = مقدار العزم الضروري لتدوير القرص بزاوية مقدارها 1 rad ، lb.f.ft (N.m)

ω_0 = السرعة الزاوية الابتدائية، rad/s .

ϕ_0 = زاوية الفتل الابتدائية للمحور، rad .

J = عزم العطالة القطبي للقرص (مع إهمال عزم عطالة المحور بالنسبة لعزم عطالة القرص) lbm.ft (N.m) .

مع بقاء الرموز p و f و ω و ϕ كما عرفناها في الاهتزازات المرنة السابقة. يعطى دور اهتزاز الفتل كما يلي:

$$p = \sqrt{\frac{K}{J}}$$

والتردد:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kg_c}{J}}$$

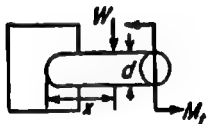
وتأخذ معادلة الحركة الشكل التالي:

$$\phi = \phi_0 \cos pt + \frac{\omega_0}{p} \sin pt$$

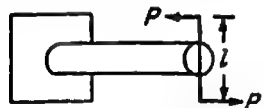
ستعرض في الفصل الحادي عشر لدراسة الاهتزاز بشكل مفصل.

الفتل

الفتل في المحاور الدائرية المصمتة



الشكل 2.4



الشكل 2.3

لدينا العلاقة:

$$S_v = \frac{M_t c}{J}$$

حيث:



S_v = إجهاد القص، psi (MPa).

M_t = عزم الفتل = pl، in.lb (N.m).

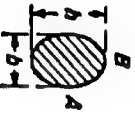
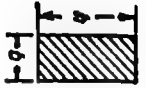
C = المسافة من المركز وحتى السطح المجهد المأخوذ، in (m).

J = عزم العطالة القطبي للمقطع (mm⁴) in⁴.

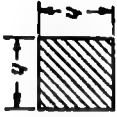
PSI , $G =$ معامل المروية للفص

المقطع العرضي	عزم مقاومة الفتل M_i	PSI , $G =$ معامل المروية للفص الارياح الراجي الطول = 1 in. (25.4 mm), المطر = 1 in. (25.4 mm)		عمل الفتل (الحجم = V)
		بدلالة عزم الفتل	بدلالة اجهاد الفص الاعظمي	
	$\frac{\pi}{16} d^3 S_o$	$\frac{M_i}{QJ} = \frac{32}{\pi d^4} \frac{M_i}{R}$	$\frac{2 S_{max}}{Q} \frac{1}{d}$	$\frac{1}{4} \frac{S_{max}}{Q} V$ (ملاحظة 1)
	$\frac{\pi}{16} \frac{D^4 - d^4}{D} S_o$	$\frac{32}{\pi (D^4 - d^4)} \frac{M_i}{Q}$	$\frac{2 S_{max}}{Q} \frac{1}{D}$	$\frac{1}{4} \frac{S_{max}}{Q} D^2 + \frac{d^2}{4} V$ (ملاحظة 2)



الجدول 2.2

	$\frac{\pi}{16} b^3 h S_o$ ($A > b$)	$\frac{16 b^3 + h^3 M_1}{\pi b^3 h^3} \frac{Q}{G}$	$\frac{S_{\max} b^3 + h^3}{G b h^3}$	$\frac{1}{8} \frac{S_{\max} b^3 + h^3}{G h^3} \gamma$ (ملاحظة 3)
	$\frac{3}{8} b^3 h S_o$ ($A > b$)	$\frac{3.6 b^3 + h^3 M_1}{b^3 h^3} \frac{Q}{G}$	$\frac{0.8 S_{\max} b^3 + h^3}{b h^3} \frac{Q}{G}$	$\frac{4}{45} \frac{S_{\max} b^3 + h^3}{G h^3} \gamma$ (ملاحظة 4)

الجدول 2.2 / نتائج

عمل الفتل ($V =$ الحجم)	a : الأبرياح الرأوى الطول = 1 in. (25.4 mm), المطر = 1 in. (25.4 mm)		عزم مقاومة الفتل M_i	المقطع العرضي
	مدالة إجهاد القص الأعظمي	مدالة عزم الفعل		
$\frac{8 S_{\max}^2}{45 V}$ (ملاحظة 5)	$1.0 \frac{S_{\max}}{G} \frac{1}{h}$	$7.2 \frac{1}{h} \frac{M_i}{G}$	$36 h^3 S_{\max}$	

الجدول 2.2 / تابع/

	$\frac{b^3}{20} S_0$	$4.62 \frac{1}{b^4} \frac{M_t}{Q}$	$2.31 \frac{S_{max}}{Q} \frac{1}{b}$	
	$\frac{b^3}{1.09} S_0$	$0.967 \frac{1}{b^4} \frac{M_t}{Q}$	$0.9 \frac{S_{max}}{Q} \frac{1}{b}$	

• عندما $h/b = 1$ $\frac{2}{3.50}$ $\frac{4}{3.35}$ $\frac{8}{3.21}$
 يصبح العامل 3.6 يصبح 3.56 يصبح 3.50 يصبح 3.35 يصبح 3.21
 عدد الدقرة الخارجة $S_{max}^{(2)}$: (2) $S_{max}^{(1)}$: (1) : الملاحظات
 عدد منتصف الصانع $S_{max}^{(5)}$: (5) $S_{max}^{(3)}$: (3) عدد $d: S_g = 16M_t/\pi b^3$:
 عدد منتصف الصانع $S_{max}^{(4)}$: (4) عدد الدقرة الخارجة $S_{max}^{(2)}$: (2) $S_{max}^{(1)}$: (1) : الملاحظات

الجدول 2.2 /تابع/

حالاتي القتل والانحناء (للمحاور الدائرية المصمتة):

انظر الشكل 2.4.

$$\sigma_{\max} = \frac{16}{\pi d^3} (M_b + \sqrt{M_b^2 + M_r^2})$$

حيث:

σ_{\max} = الإجهاد الأعظمي، psi (MPa).

M_t = العزم، in.lb (N.m).

M_b = العزم الناتج عن حمل الانحناء، in.lb (N.m).

d = قطر القضيب، in (mm).

و

$$M = \frac{\sigma I}{c}$$

حيث:

M = عزم الانحناء، in.lb (N.m).

σ = الإجهاد المرن عند المسافة c من محور التعادل، psi (MPa).

c = المسافة من محور التعادل إلى المستوي الخاوي للإجهاد σ المحسوب، in (m).

I = عزم العطالة لمساحة المقطع حول محور التعادل، in⁴ (mm⁴).

$1/c$ = معامل المقطع، حيث تمثل c المسافة حتى آخر شريط عنصري in³ (mm³).

إجهادات الاسطوانة

الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات قليلة السماكة (ذات المقاطع الصغيرة)

انظر الشكل 2.4

$$\sigma_h = \frac{pd}{2t} \quad \sigma_l = \frac{pd}{4t}$$

حيث:

σ_h - الإجهاد الحلقي (المحيطي)، (MPa) (psi).

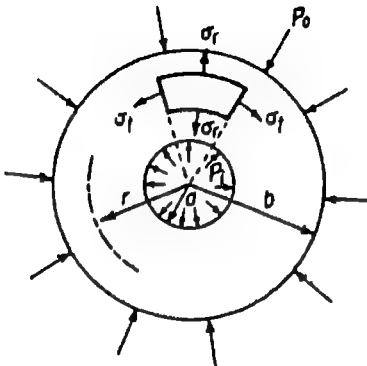
σ_l - الإجهاد الطولي، (MPa) (psi).

d - القطر الداخلي، (mm) (in).

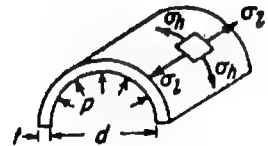
p - الضغط الداخلي، (MPa) (psi).

t - سماكة جدار الأنبوب، (mm) (in).

الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات ذات السماكة الكبيرة



الشكل 2.6



الشكل 2.5

في حال وجود ضغط داخلي فقط:

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

في حالة وجود ضغط خارجي فقط:

$$\sigma_r = \frac{P_0 b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{P_0 b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

حيث:

σ_r = الإجهاد القطري (في الاتجاه القطري)، (psi (MPa).

σ_t = الإجهاد المحيطي (في اتجاه المحيط للدائرة المارة بالعنصر المدروس)، (psi (MPa).

a = نصف القطر الداخلي للأسطوانة، in (mm).

b = نصف القطر الخارجي للأسطوانة، in (mm).

r = نصف قطر العنصر المدروس، in (mm).

P_i = الضغط الداخلي، (psi (MPa).

P_0 = الضغط الخارجي، (psi (MPa).

3

معادلات الإجهادات
في العناصر الميكانيكية

الإجهادات الناعظمية والأساسية

الإجهادات الناعظمية

يمكن تحديد الإجهادات الناعظمية الأصغرية والأعظمية - $s_n(\max)$ ، $s_n(\min)$ - والتي هي إجهادات شد أو ضغط وبالحالة العامة لتحميل ثنائي البعد كما يلي:

$$s_n(\max) = \frac{s_x + s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$s_n(\min) = \frac{s_x + s_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

تعطي العلاقتان السابقتان القيم الجبرية العظمى والصغرى، حيث:

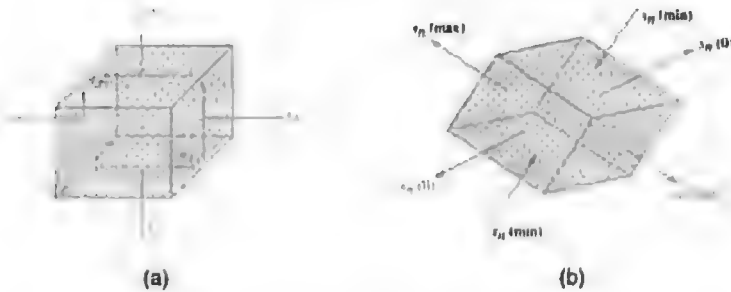
s_x يمثل الإجهاد عند النقطة الحرجة، حيث يمكن أن يؤثر إجهاد شد أو ضغط ناعظمي على المقطع المعبر، والذي يمكن أن ينتج عن حمولات محورية أو حمولات انعطاف أو كليهما. عندما يكون s_x إجهاد شد فيجب أن يسبق بإشارة موجبة (+)، أما إذا كان إجهاد ضغط فميسبق بإشارة سالبة (-).

s_y يمثل إجهاد في نفس النقطة وفي اتجاه معامد للإجهاد s_x ، ويجب أن تسبق هذا الإجهاد أيضاً إشارة جبرية.

τ_{xy} يمثل إجهاد القص عند نفس النقطة الحرجة وهو واقع في المستوي العمودي على المحور y (والذي هو المستوي xz) والمستوي العمودي على المحور x (والذي يمثل المستوي yz). وقد ينتج إنتاج القص هذا عن عزوم الالتواء أو الحمولات العرضية أو حمولات مركبة من كليهما. ويظهر الشكل 3.1a كيفية توضع هذه الإجهادات.

يدعى الإجهادان $s_n(\max)$ و $s_n(\min)$ بالإجهادين الأساسيين واللذين يتوضعان في مستويين متعامدين يدعان المستويين الأساسيين، ولا يحوي هذان المستويان أي

إجهادات قص. إذا كان هناك تحميل ثنائي البعد فسيكون الإجهاد الرئيسي الثالث معدوماً، وبين الشكل 3.1b توضع هذه الإجهادات بالنسبة لبعضها البعض.



الشكل 3.1: (a) توضع إجهاد القص (b) توضع الإجهادات الأساسية.

إجهاد القص الأعظمي

يُحسب إجهاد القص الأعظمي عند النقطة المخرجة على أنه نصف أكبر فرق بين إجهادين أساسيين (مع عدم إهمال أي إجهاد أساسي معدوم). ومن أجل حالة التحميل ثنائي البعد التي تسبب إجهادات ثنائية البعد سيكون لدينا:

$$\tau(max) = \frac{s_n(max) - s_n(min)}{2}$$

أو

$$\frac{s_n(max) - 0}{2}$$

أو

$$\frac{s_n(min) - 0}{2}$$

حيث نأخذ النتيجة الأكبر بين النتائج السابقة، وبميل المستوي الحاوي لإجهاد القص الأعظمي بزاوية 45° عن المستويات الرئيسية.

تطبيق

يتطلب تطبيق علاقتي الإجهاد:

$$s_n(\max) = \frac{s_x + s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$s_n(\min) = \frac{s_x + s_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

معرفة s_x و s_y و τ_{xy} عند النقطة الحرجة من العنصر الميكانيكي. ونقصد بالنقطة الحرجة تلك النقطة التي ينتج عندها إجهاد مركب أعظمي ناتج عن الحمل المطبق، وإذا كان لدينا قضيب وطبقنا عليه حمولات أدت إلى الإجهادات التالية عند نفس النقطة:

$$s_x \text{ and } s_y = \pm \frac{Mc}{I} \pm \frac{P}{A}$$

تذكر بأن هذه الإجهادات يمكن أن تكون سالبة أو موجبة، وذلك اعتماداً على كونها إجهادات شد أو ضغط.

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} + s_v$$

تعطى العلاقة السابقة عندما يكون مقطع القضيب دائرياً (وعندما تكون هذه الإجهادات متوازية).

حيث

$$M = \text{عزم الانحناء، in.lb (N.m).}$$

$$c = \text{المسافة بين محور التعادل والسطح الخارجي، in (mm).}$$

$$r = \text{نصف قطر المقطع، in (mm).}$$

$$I = \text{عزم عطالة المقطع، in}^4 \text{ (mm}^4\text{).}$$

$$P = \text{الحمل المحوري، Lb (N).}$$

$$A = \text{مساحة المقطع، in}^2 \text{ (mm}^2\text{).}$$

$$T = \text{عزم الفتل، in.lb (N.m).}$$

$$J = \text{عزم العطالة القطبي للمقطع، (mm}^4\text{).}$$

$$s_v = \text{إجهاد القص العرضي، psi (MPa).}$$

$$s_v = \frac{VQ}{Ib}$$

حيث

$$V = \text{حمولات القص العرضية على المقطع، lb (N).}$$

$$b = \text{عرض المقطع الحاوي على النقطة الحرجة.}$$

$$Q = \text{عزم مساحة المقطع للعنصر، فوق أو أعلى النقطة الحرجة، هو مأخوذ بالنسبة لمحور التعادل in}^3 \text{ (mm}^3\text{).}$$

$$s_v(\max) = \frac{4V}{3A} \text{ للمقاطع الدائرية ويتوضع وفق محور التعادل.}$$

$$s_v(\max) = \frac{3V}{2A} \text{ للمقاطع المستطيلة ويتوضع وفق محور التعادل.}$$

$$s_n(\max) = \text{الإجهاد الجبري الأعظمي، psi (MPa).}$$

s_n (min) = الإجهاد الجبري الأصغري، psi (MPa).

τ (max) = إجهاد القص الأعظمي، psi (MPa).

الإجهادات الناتجة عن العناصر المتداخلة

يمكن حساب هذه الإجهادات بعد اعتبار الأجزاء المتداخلة هي اسطوانات كبيرة السماكة، كما هو واضح بالشكل 3.2، بالعلاقة التالية:

$$P_c = \frac{\delta}{d_c \left[\frac{d_c^2 + d_i^2}{E_i(d_c^2 - d_i^2)} + \frac{d_o^2 + d_c^2}{E_o(d_o^2 - d_c^2)} - \frac{\mu_i}{E_i} + \frac{\mu_o}{E_o} \right]}$$

حيث:

P_i = الضغط عند سطح التماس، psi (MPa).

δ = التداخل الكلي، in (mm).

d_i = القطر الداخلي للأسطوانة الداخلية، in (mm).

d_c = قطر سطح التماس، in (mm).

d_o = القطر الخارجي للأسطوانة الخارجية، in (mm).

μ_o = نسبة بواسون للأسطوانة الخارجية.

μ_i = نسبة بواسون للأسطوانة الداخلية.

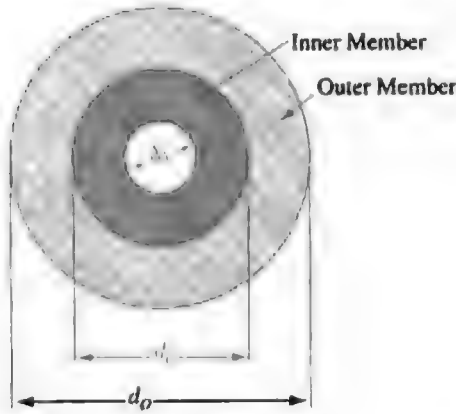
E_o = عامل المرونة للأسطوانة الخارجية، psi (MPa).

E_i = عامل المرونة للأسطوانة الداخلية، psi (MPa).

إذا كانت الاسطوانتان الخارجية والداخلية مصنوعتان من نفس المعدن فيمكن إعادة صياغة المعادلة السابقة لتصبح كما يلي:

$$P_c = \frac{\delta}{2d_c^3(d_o^2 - d_i^2) / [E(d_c^2 - d_i^2)(d_o^2 - d_c^2)]}$$

بعد تحديد P_c فإن الإجهادات المماسية الحقيقية عند السطوح المختلفة والمحددة بمعادلة Lamé، والتي تستخدم في منطقة الاتصال ووفق نظرية الانهيار وفق إجهاد القص الأعظمي يمكن أن تحسب كما يلي:



الشكل 3.2

على السطح الخارجي عند d_o :

$$s_{to} = \frac{2p_c d_c^2}{d_o^2 - d_c^2}$$

على السطح عند d_c ومن جهة الأسطوانة الخارجية:

$$s_{tco} = p_c \left(\frac{d_o^2 + d_c^2}{d_o^2 - d_c^2} \right)$$

على السطح d_c ومن جهة الاسطوانة الداخلية:

$$s_{ici} = -p_c \left(\frac{d_c^2 + d_i^2}{d_c^2 - d_i^2} \right)$$

على السطح الداخلي عند d_i :

$$s_{ii} = \frac{-2p_c d_c^2}{d_c^2 - d_i^2}$$

أما الإجهادات المماسية المكافئة عند السطوح المختلفة والمحسوبة وفق معادلة Birnie، والتي تستخدم في منطقة الاتصال ووفق نظرية الانهيار وفق الانفعال الأعظمي فيمكن حسابها كما يلي:

على السطح الخارجي للأسطوانة الخارجية d_o :

$$s'_{io} = \frac{2p_c d_c^2}{d_o^2 - d_c^2}$$

على السطح d_c من جهة الاسطوانة الخارجية:

$$s'_{ico} = p_c \left(\frac{d_o^2 + d_c^2}{d_o^2 - d_c^2} + \mu_o \right)$$

على السطح d_c ومن جهة الاسطوانة الداخلية:

$$s'_{ici} = -p_c \left(\frac{d_c^2 + d_i^2}{d_c^2 - d_i^2} - \mu_i \right)$$

على السطح الداخلي عند d_i :

$$s'_{ii} = \frac{-2p_c d_c^2}{d_c^2 - d_i^2}$$

القوى والعزوم

تناسب القوة المحورية العظمى F_a المطلوبة لإنجاز هذا التداخل بشكل طردي مع عدة عوامل منها، سماكة الاسطوانة الخارجية وطولها والفرق بين قطري الاسطوانتين المتداخلتين ومعامل الاحتكاك، ويمكن حساب هذه القوة بقيم تقريبية كما في العلاقة التالية:

$$F_a = f \pi d L p_c$$

ويعطى العزم الذي يمكن نقله عبر هذا التداخل بين الاسطوانتين بدون انزلاق بالعلاقة:

$$T = \frac{f p_c \pi d^2 L}{2}$$

حيث:

F_a = القوة المحورية، lb (N).

T = العزم المنقول، in.lb (N.m).

d = قطر المحور الاسمي، in (mm).

f = معامل الاحتكاك.

L = طول الاسطوانة الخارجية، in (mm).

p_c = ضغط الاتصال بين الاسطوانتين، psi (MPa).

تجميع الأجزاء المتداخلة

يتم التجميع غالباً بتسخين الاسطوانة الخارجية حتى تتمدد على الأقل بمقدار التداخل، ويعطى فرق درجة الحرارة المطلوب لتمديد القطر الداخلي للاسطوانة الخارجية بمقدار δ بالعلاقة:

$$\Delta T = \frac{\delta}{\alpha d_i}$$

حيث:

δ = التداخل القطري، in (mm).

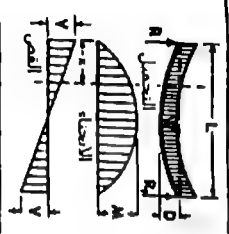
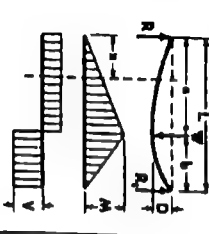
α = معامل التمدد الخطي لكل $^{\circ}\text{F}$ ($^{\circ}\text{C}$).

ΔT = التغير في درجة الحرارة، $^{\circ}\text{F}$ ($^{\circ}\text{C}$).

d_i = القطر الداخلي للاسطوانة الخارجية قبل التمدد، in (mm).

وبالتوازي مع تسخين الاسطوانة الخارجية يتم تبريد الاسطوانة الداخلية بطرق التبريد المختلفة مثل الجليد الجاف.

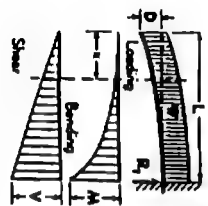
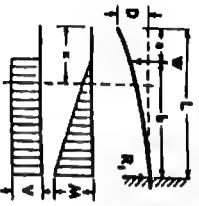
معادلات الجوائز

المخططات	ردود الفعل R	قوة القص V	عزم الانحناء M	الشد D
الحالة 1 : جازر مسند الهلاليين، حمل مستمر، مربع بانتظام				
	$R = R_1 = V(\max) = \frac{V}{2}$ $V = \frac{V}{2} - \frac{W_x}{L}$ عند :	$M(\max) = \frac{Vx}{2}$ $M = \frac{V}{2L}(L-x)$ عند :	$D(\max) = \frac{9}{384} \frac{Vx^3}{EL}$ $D = \frac{W_x}{24 EL} (L^2 - 2Lx + x^2)$ عند :	
الحالة 2 : جازر مسند الهلاليين، حمل مركزى، أى نقطة.				
	$R = \frac{Vb}{L}$ $R_1 = \frac{W_a}{L}$ فلهذا عند R_1 و R_2 عندما $V(\max) = R$ أهـ 3: $V = \frac{W_b}{L}$	$M(\max) = \frac{Vab}{L}$ $M(\max) = \frac{W_a b}{L}$ عند $X > a$ عندما X	$D = \frac{W_a}{6 EL} [2L(a-x)^2 - (a-x)^3]$ $D = \frac{W_b}{6 EL} [2Lx^2 - (x-a)^3]$ عند x	

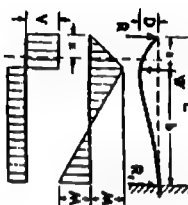
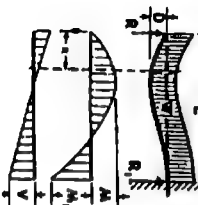
الجدول 3.1 معادلات الجوازات

حالة 5 : جاذب مثبت النهائيين، وبحمل مستمر وتوزيع منتظم			
	$R = R_1 = V(\text{عند } \pi) = \frac{W}{2}$ $V = \frac{W}{2} - \frac{Wx}{L}$ $x \text{ عند } \pi$	$M(\text{عند } \pi) = \frac{WL}{24}$ $M_1(\text{عند } \pi) = \frac{WL}{12}$ $M = \frac{W}{24} \left(-\frac{1}{6} + \pi a - \pi^2 \right)$	$D(\text{عند } \pi) = \frac{1}{384} \frac{W L^3}{E I}$ $D = \frac{W q^2}{384 E I} (l^2 - 2\pi a + \pi^2)$ $x \text{ عند } \pi$
حالة 6 : جاذب مثبت النهائيين وبحمل مركز عند أي نقطة			
	$R = W \left(\frac{b^2 (3a + b)}{L^2} \right)$ $R_1 = W \left(\frac{a^2 (3b + a)}{L^2} \right)$ $V(\text{عند } \pi) = R \text{ عندما } a < b$ $= R_1 \text{ عندما } a > b$ $V = R$	$x \text{ عند المسد } \pi$ $M_1 \left(\frac{\text{عند المسد } \pi}{\text{عند المسد } \pi} \right) = -W \frac{a^2 b^2}{L^2}$ $M_2 \left(\frac{\text{عند المسد } \pi}{\text{عند المسد } \pi} \right) = -W \frac{a^2 b^2}{L^2}$ $M(\text{عند } \pi) = R_1 + M_1 = R_2 - W \frac{a^2 b^2}{L^2}$ $x \text{ عند } \pi: M = R_2 - W \frac{a^2 b^2}{L^2}$	$D(\text{عند } \pi) = \frac{2a^2 b}{3a + b}$ $D(\text{عند } \pi) = \frac{3W a^2 b^3}{32 E I (3a + b)^3}$ $x \text{ عند } \pi$ $D = \frac{W^2 b^3}{6 E I^2} (3aL - 3a\pi - b\pi)$

الجدول 3.1 معادلات الجوائز / انابع

المخططات	ردود الفعل R	قوة القص V	عزم الانحناء M	الانحاف D
الحالة 7 : حائط مثبت من طرف واحد، حمل مستمر ووزن منتظم				
	$R_1 = V(\text{max}) = -qL$ $M_x = -\frac{q x^2}{2}$ $V = -\frac{q x}{1}$	<p>عند النهاية الثابتة:</p> $M(\text{max}) = -\frac{qL^2}{2}$ $M = -\frac{q x^2}{2}$	<p>عند النهاية الحرة:</p> $D(\text{max}) = \frac{qL^3}{8EI}$ $D = \frac{q}{24EI} (x^3 - 4L^2x + 3L^3)$	
الحالة 8 : حائط مثبت من طرف واحد، حمل مركز عند أي نقطة				
	$R_1 = V(\text{max}) = -P$ عند $x > a$: $V = -P$ عند $x < a$: $V = 0$	<p>عند النهاية الثابتة:</p> $M(\text{max}) = -Pa$ عند $x > a$: $M = -P(a - x)$	<p>عند النهاية الحرة:</p> $D(\text{max}) = \frac{PL^3}{6EI} \left[2 - \frac{3a}{L} + \left(\frac{a}{L}\right)^3 \right]$ عند نقطة تطبيق القوة: $D = \frac{P}{3EI} (L - a)^3$ عند $x > a$: $D = \frac{P}{6EI} (-3aL^2 + 3L^3 + a^3 - 3a^2L - 3L^2a + 6aL^2)$	

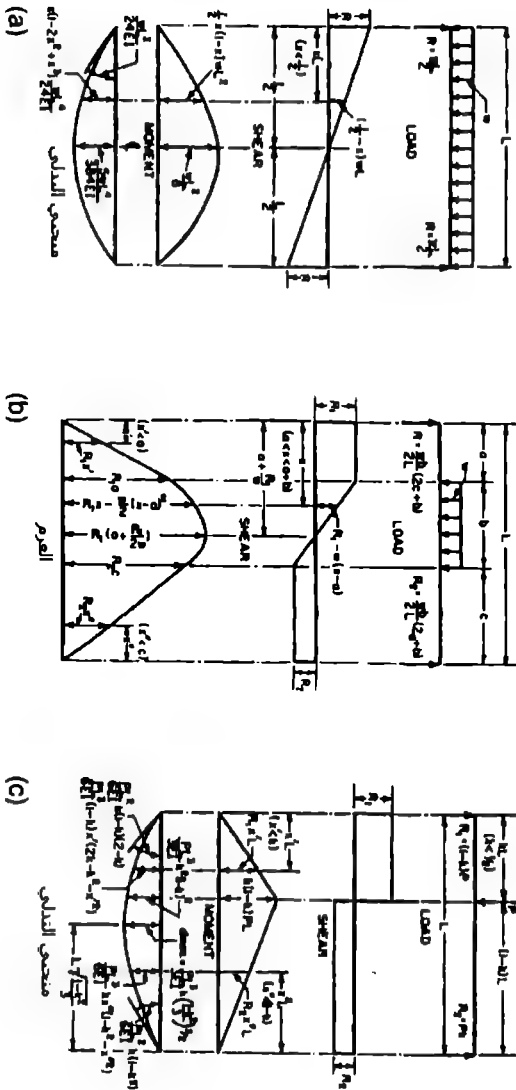
المحور 3.1 معادلات الجوانب /تابع/

الحالة 9 : جدار مثبت من طرف ويسند من الطرف الآخر، حمل مركز عند أي نقطة.		
	$R = W \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right)$ $R_1 = W \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right)$ $= \quad a < a \quad V = R$ $= \quad a > a \quad V = R - W$	<p>عند نقطة بطى القوة:</p> $M (max) = W a \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right)$ <p>عند النهاية الثانية:</p> $M_1 (max) = WL \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right) - W(L-a)$ $M = W a \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right)$ $M = W a \left(\frac{3L^2 - a^2}{2L^3} \right) - W(L-a)$
<p>عند $a = 0$: $M (max) = 0$</p> <p>عند $a = L$: $M (max) = 0.0098 \frac{WL^2}{EI}$</p> $D = \frac{1}{6EI} \left[\frac{3RL^3}{3} - R a^3 - \right]$ $D = \frac{1}{6EI} \left[R_1 (2L^3 - 3L^2 a + a^3) - \right]$	<p>عند $a = 0$: $M (max) = 0$</p> <p>عند $a = L$: $M (max) = 0.0034 \frac{WL^2}{EI}$</p> $D = \frac{1}{48EI} \left[-3La^3 + 2a^3 + L^3 \right]$	

المجول 3.1 معادلات الجوانب /تابع/

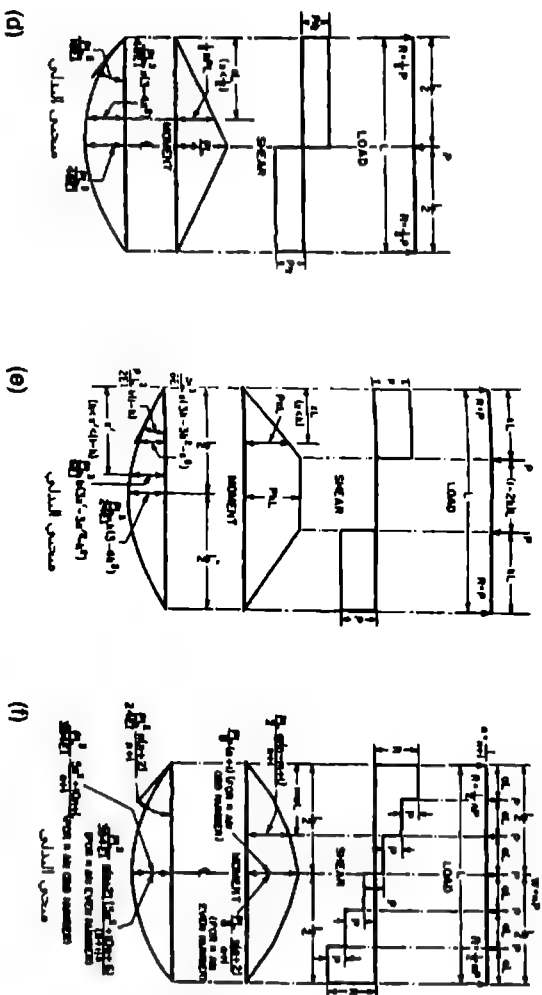
الحالة 11 : خاتر سوانيس باريس، توضع عبر منطوق، حمل مستطير وموزع منتظم		<p>الحمل لكل وحدة طول $w = \frac{W}{L+2a}$</p> <p>$R = w[(a+L)^2 - b^2] + 2L$</p> <p>$R_1 = w[(b+L)^2 - a^2] + 2L$</p> <p>$V(mn) = wn$ $R - wn$</p> <p>\approx when $a < b$ $V = w(a-a)$</p> <p>\approx when $a_1 < L$ $V = R - w(a+a_1)$</p> <p>\approx when $a_2 < b$ $V = w(b-a_2)$</p>
عدد سوانيس باريس، توضع عبر منطوق، مع حمل مركزي منتظم	<p>عدد R_1 : $M(mn) = R\left(\frac{R}{2n} - a\right)$</p> <p>عدد R_2 : $M_1 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_3 : $M_2 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_4 : $M_3 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_5 : $M_4 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_6 : $M_5 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_7 : $M_6 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_8 : $M_7 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_9 : $M_8 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{10} : $M_9 = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{11} : $M_{10} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{12} : $M_{11} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{13} : $M_{12} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{14} : $M_{13} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{15} : $M_{14} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{16} : $M_{15} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{17} : $M_{16} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{18} : $M_{17} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{19} : $M_{18} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{20} : $M_{19} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{21} : $M_{20} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{22} : $M_{21} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{23} : $M_{22} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{24} : $M_{23} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{25} : $M_{24} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{26} : $M_{25} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{27} : $M_{26} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{28} : $M_{27} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{29} : $M_{28} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{30} : $M_{29} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{31} : $M_{30} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{32} : $M_{31} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{33} : $M_{32} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{34} : $M_{33} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{35} : $M_{34} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{36} : $M_{35} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{37} : $M_{36} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{38} : $M_{37} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{39} : $M_{38} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{40} : $M_{39} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{41} : $M_{40} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{42} : $M_{41} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{43} : $M_{42} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{44} : $M_{43} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{45} : $M_{44} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{46} : $M_{45} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{47} : $M_{46} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{48} : $M_{47} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{49} : $M_{48} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{50} : $M_{49} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{51} : $M_{50} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{52} : $M_{51} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{53} : $M_{52} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{54} : $M_{53} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{55} : $M_{54} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{56} : $M_{55} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{57} : $M_{56} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{58} : $M_{57} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{59} : $M_{58} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{60} : $M_{59} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{61} : $M_{60} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{62} : $M_{61} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{63} : $M_{62} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{64} : $M_{63} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{65} : $M_{64} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{66} : $M_{65} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{67} : $M_{66} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{68} : $M_{67} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{69} : $M_{68} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{70} : $M_{69} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{71} : $M_{70} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{72} : $M_{71} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{73} : $M_{72} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{74} : $M_{73} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{75} : $M_{74} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{76} : $M_{75} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{77} : $M_{76} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{78} : $M_{77} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{79} : $M_{78} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{80} : $M_{79} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{81} : $M_{80} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{82} : $M_{81} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{83} : $M_{82} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{84} : $M_{83} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{85} : $M_{84} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{86} : $M_{85} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{87} : $M_{86} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{88} : $M_{87} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{89} : $M_{88} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{90} : $M_{89} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{91} : $M_{90} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{92} : $M_{91} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{93} : $M_{92} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{94} : $M_{93} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{95} : $M_{94} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{96} : $M_{95} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{97} : $M_{96} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{98} : $M_{97} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{99} : $M_{98} = \frac{1}{2}wn^2$</p> <p>عدد R_{100} : $M_{99} = \frac{1}{2}wn^2$</p>	<p>عدد السوانيس الحرس:</p> <p>$D = \frac{W_0^2 (2L+2a)}{12EI}$</p> <p>عدد المركز:</p> <p>$D = \frac{W_0 L^3}{16EI}$</p>

الجدول 3.1 محادلات الجوائز /تابع/



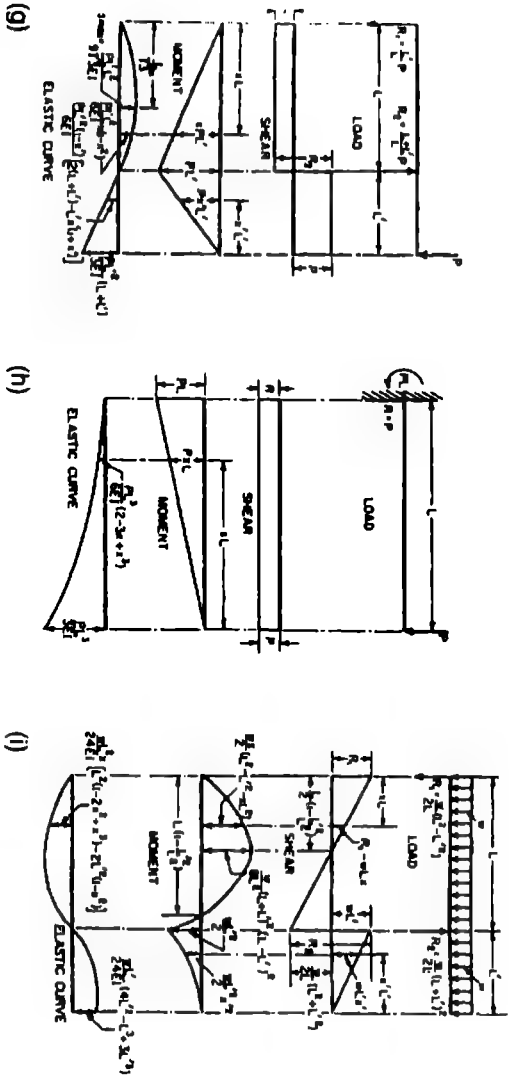
الشكل 3.3 معادلات منحنيات التآكل للجوائز المشورية

(a) اندلي والزم والقص جازر موشوري بهائين مسندتين وكميل منتظم على كامل الجازر.
(b) القص والزم جازر موشوري بهائين مسندتين وكميل منتظم على جزء من الجازر.
(c) اندلي والزم والقص جازر موشوري بهائين مسندتين وكميل مركز على أي نقطة.



الشكل 3.3 معادلات منحنيات التبدلي للحواريز الموضعية /تابع/

- (d) التبدلي والعزم والقص بسيط الجائر بسيط الاسناد ويحمل مركز في منتصف الجائر.
- (e) التبدلي والعزم والقص بسيط الجائر بسيط الاسناد مع حملين مركبين متساويين.
- (f) التبدلي والعزم والقص بسيط الجائر بسيط الاسناد مع عدة أحمال متساوية تفصل بينها مسافات متساوية.

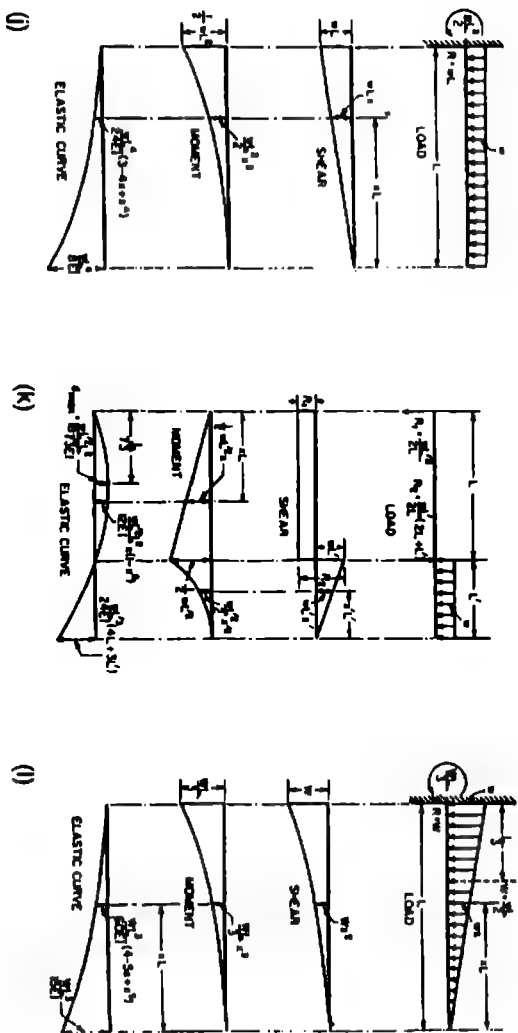


الشكل 3.3 معادلات مستحنيات التبدلي للحوائز الموشورية / انابع

(g) التبدلي والعزم والقص لجائز ذو نهاية بارزة عليها حمل مركز.

(h) التبدلي والعزم والقص لجائز مثبتت من طرف واحد وحمولة مركزة على طرفه الآخر.

(i) التبدلي والعزم والقص لجائز بارز النهاية وعليه حمولة منتظمة موزعة على كامل طول.

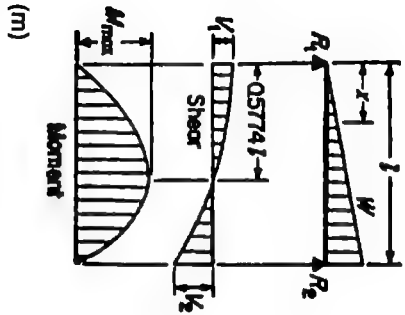


الشكل 3.3 معادلات منحنيات التبدل للمحاور المتشعبة /

(ن) التبدل والعزم والقص لجائر مثبت من طرفه وعليه حمولة موزعة بانتظام على كامل طوله.

(ك) التبدل والعزم والقص لجائر بنهاية بارزة عليها حمولة موزعة بانتظام.

(ل) التبدل والعزم والقص لجائر بنهاية موزونة وعليه حمولة موزعة على شكل مثلث.



$$R_1 = V_1$$

$$R_2 = V_2 \text{ max}$$

$$V_1$$

$$M_{\text{max}} \left(\text{at } z = \frac{l}{\sqrt{3}} = .5774l \right)$$

$$M_0$$

$$\Delta_{\text{max}} \left(\text{at } z = l \sqrt{1 - \sqrt{\frac{8}{15}}} = .5193l \right)$$

$$\Delta_0$$

$$= \frac{w}{3}$$

$$= \frac{2w}{3}$$

$$= \frac{w}{3} - \frac{wz^2}{l^2}$$

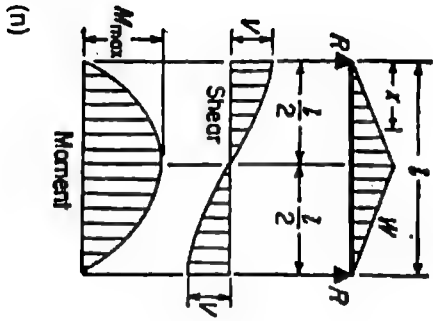
$$= \frac{2w}{3\sqrt{3}} = .1283wl$$

$$= \frac{wz}{2l^2} (l^2 - z^2)$$

$$= .01804 \frac{wl^3}{EI}$$

$$= \frac{wz}{180EI} (3z^2 - 10z^4 + 7l^2)$$

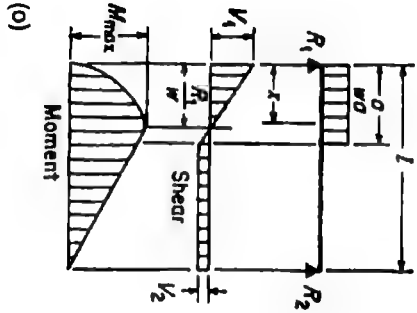
الشكل 3.3 معادلات منحنيات التمثيل للجوائز الموشورية /تابع/
 (m) جانز بسيط الاسناد مع حمولة تزداد بانتظام من نهاية النهاية الأخرى.



(n)

$$\begin{aligned}
 R &= V \\
 &= \frac{w}{2} \\
 V_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2} \right) &= \frac{w}{2l} (l^2 - 4x^2) \\
 M_{\max} \text{ (at center)} &= \frac{wl^3}{6} \\
 M_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2} \right) &= \frac{w}{6} x \left(\frac{l}{2} - \frac{2x^2}{3l} \right) \\
 \Delta_{\max} \text{ (at center)} &= \frac{wl^4}{60EI} \\
 \Delta_x &= \frac{wx^5}{480EI l^3} (3l^2 - 4x^2)
 \end{aligned}$$

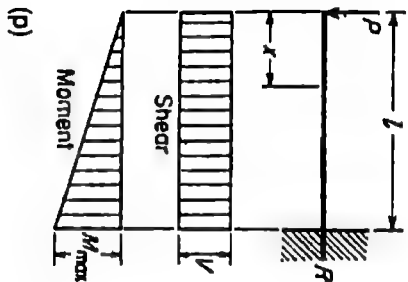
الشكل 3.3 معادلات منحنيات التمثيل للجوائز الموشورية /تابع/
 جانز بسيط الاسناد مع حمولة تزداد بانتظام من النهايتين إلى المركز.



$$\begin{aligned}
 R_1 &= V_{1, \max} &= \frac{w a}{2} (2l - a) \\
 R_1 &= V_1 &= \frac{w a^2}{2l} \\
 V \text{ (when } x < a) &= R_1 - w x \\
 M_{\max} \left(\text{at } x = \frac{R_1}{w} \right) &= \frac{R_1^2}{2lw} \\
 M_x \text{ (when } x < a) &= R_1 x - \frac{w x^2}{2} \\
 M_x \text{ (when } x > a) &= R_1 (l - x) \\
 \Delta_s \text{ (when } x < a) &= \frac{w x^2}{24 E I l} [a^2 (2l - a) x^2 - 2 a x^3 (2l - a) + l x^4] \\
 \Delta_s \text{ (when } x > a) &= \frac{w a^2 l}{24 E I l} (4 l^2 - 2 x^2 - a^2)
 \end{aligned}$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التبدلي للحوائر الموشورية /تابع/

٥) جانز بسيط الاسناد مع حمولة منتظمة جزئية متوضعة على إحدى نهايتيه.

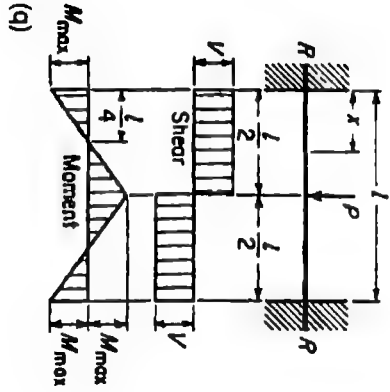


(p)

$$\begin{aligned}
 R &= V \\
 M_{\max} \text{ (عد النهاية الثابتة)} &= P l \\
 M_c &= P x \\
 \Delta_{\max} \text{ (عد النهاية الحرة)} &= \frac{P l^3}{3 E I} \\
 \Delta_c &= \frac{P}{6 E I} (2 l^3 - 3 l x^2 + x^3)
 \end{aligned}$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التبدل للحوائر الموضعية /تابع/

(p) جانز مونوف من طرف، مع حولة مركزة على نهاية الحرة.



(q)

$$\begin{aligned}
 R &= V \\
 &= \frac{P}{2} \\
 M_{\max} \text{ (عند الماكس والمركز)} &= \frac{Pl}{8} \\
 M_z \left(\text{عندما } z < \frac{l}{2} \right) &= \frac{P}{8} (4z - l) \\
 \Delta_{\max} \text{ (عند المركز)} &= \frac{Pl^3}{192EI} \\
 \Delta_z &= \frac{Pz^3}{48EI} (3l - 4z)
 \end{aligned}$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التبدلي للحوائر الموشورية /تابع

(q) جانز مونتق النهايتين مع حولة مركزة في المنتصف.

سنورد الآن جدولاً يبين الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن المشهورة:

الجدول 3.2

الكثافة kg/m ³	نسبة بواسون، μ	معامل المرونة، $G \times 10^{-3}$		معامل المرونة، $E \times 10^{-3}$		المعدن
		(kgf/mm ²) MN/m ²	(kgf/mm ²) MN/m ²	(kgf/mm ²) MN/m ²	(kgf/mm ²) MN/m ²	
2730	0.334	(2.67)	26.2	(7.24)	71.0	Aluminium (خلائط)
1820	-	-	-	(29.28)	287.1	Beryllium
8230	0.285	(4.92)	48.3	(12.66)	124.2	Beryllium copper
8450	0.30 - 0.40	(3.50)	34.3	(9.70)	95.1	Brass
8730	-	-	-	(11.10)	109.0	Bronze
7820	0.292	(8.00)	78.5	(20.60)	202.0	Carbon steel
7200	0.211	(4.22)	41.4	(10.20)	100.0	Cast Iron, gray
8960	0.260	(3.90)	38.3	(12.30)	120.6	Copper
8960	0.290	(7.75)	76.0	(21.80)	214.0	Inconel
11340	0.450	(0.76)	7.5	(1.60)	15.7	Lead
1800	0.350	(1.69)	16.6	(4.57)	44.8	Megnesium
10200	0.307	(11.95)	117.2	(33.75)	331.0	Molybdenum
8830	0.320	(6.68)	65.6	(18.28)	179.3	Monel metal
8690	0.322	(4.92)	48.3	(13.00)	127.5	Nickel silver
7750	0.291	(7.80)	75.6	(20.00)	196.1	Nickel steel
8160	0.349	(4.22)	41.4	(11.32)	111.0	Phosphor bronze
7750	0.305	(7.45)	73.1	(19.40)	190.3	Stainless steel (18 - 8)
4480	-	-	-	(10.55)	103.5	Titanium
19300	0.170	(17.70)	173.6	(41.53)	437.3	Tungsten
6500	-	-	-	(6.97)	68.4	Zirconium

الجدول 3.3 عامل الوثوقية (عامل الأمان)

المستسل	التفصيل	عامل الأمان R
1	عندما يتم التحكم بالأبعاد النهائية واختيارها أثناء الإنتاج، ويتم شراء المعادن بحيث تكون خصائصها دقيقة جداً مثل حالة تصميم الطائرات وعربات الفضاء	1.0
2	إذا ضمنت تجارة عالية الوثوقية للمعادن، وعندما نستطيع تحديد الحمولات والإجهادات بشكل دقيق واستخدام قانون دقيق للتصميم.	1.1 إلى 1.5
3	لنفس اعتبارات البند الثاني، إلا أن قانون التصميم غير صارم أو دقيق	1.5 إلى 2.0
4	للمعادن العادية، وإذا كان من المحتمل زيادة الحمل، والوثوقية أو الأمان هام جداً	2.0 إلى 3.0
5	للعناصر المصنوعة من حديد الزهر أو حديد الصب (Cast iron)، وإذا كانت الحمولات غير محددة في التصميم، وإذا لم نستطع تحديد الإجهادات بدقة	3 فما فوق
6	في حالة التصميم الميكانيكي للعناصر المصنوعة من الفولاذ أو الألمنيوم	1.25 إلى 1.5
7	إذا كانت المواد (من الفولاذ أو الألمنيوم) ليست من النوعية الجيدة، أو إذا لم تكن هناك معلومات حول جودتها.	2.00

الجدول 3.4 اللدونة في حالة الشد

المعدن	حد المرونة σ MN/m ² (kgf/mm ²)	معامل المرونة $E \times 10^{-3}$ MN/m ² (kgf/mm ²)	معامل اللدونة u mJ/mm ³ (mm kgf/mm ³)	قوة الصدم (Izod عدد)
الحديد (CAST IRON)				
الصب أو حديد الزهر				
Class 20 (عادي) ..	43.2° (4.40)	68.7 (7.00)	0.215 (0.022)	7.9
Class 25 ..	68.7° (7.00)	89.2 (9.10)	0.430 (0.044)	
Nickel, Grade II ..	118.0° (12.00)	124.5 (12.70)	0.905 (0.092)	
Malleable ..	138.3 (14.10)	172.6 (17.60)	0.905 (0.092)	
Aluminium alloy, SAE 33 ..	48.1 (4.90)	66.7 (6.80)	0.280 (0.029)	
2.7				
Brass, SAE 40 or SAE 41 ..	68.7 (7.00)	82.4 (8.40)	0.452 (0.046)	120
Bronze, SAE 43 ..	193.2 (19.70)	110.8 (11.30)	2.770 (0.282)	
MONEL METAL				
.. دلمة على الساخن	206.0 (21.10)	176.5 (18.00)	2.000 (0.203)	110
.. دلمة على البارد، مطيع	482.5 (49.20)	176.5 (18.00)	10.850 (1.106)	
(STEEL) فولاد				
SAE 1010 ..	207.0 (21.10)	207.0 (21.10)	1.695 (0.173)	20
SAE 1030 ..	252.0 (25.70)	207.0 (21.10)	2.490 (0.254)	
SAE 1050, annealed مُلْدَد ..	334.4 (34.10)	206.0 (21.00)	4.290 (0.438)	
SAE 1095, annealed مُلْدَد ..	414.0 (42.20)	206.0 (21.00)	6.780 (0.691)	

المعدن	حد المرونة σ MN/m ² (kgf/mm ²)	معامل المرونة $E \times 10^{-3}$ MN/m ² (kgf/mm ²)	معامل اللدونة u mJ/mm ³ (mm kgf/mm ³)	قوة الصدم (Izod عدد)
SAE 1095, مراجع tempered	516.8 (52.70)	206.0 (21.00)	10.620 (1.083)	
SAE 2320, annealed .. مُلْدَن	310.0 (31.60)	206.0 (21.00)	3.840 (0.392)	52
SAE 2320, مراجع tempered..	690.0 (70.30)	206.0 (21.00)	18.870 (1.924)	40
SAE 3250, annealed .. مُلْدَن	552.0 (56.25)	214.0 (21.80)	21.810 (2.224)	
SAE 3250, مراجع tempered.	1383.0 (141.00)	214.0 (21.80)	72.880 (7.431)	30
SAE 6150, annealed .. مُلْدَن	427.6 (43.60)	214.0 (21.00)	7.005 (0.714)	
SAE 6150, مراجع tempered..	1100.0 (112.50)	214.0 (21.80)	52.650 (5.369)	
(Rubber) مطاط ..	2.1 (0.21)	1.0×10^{-3} (0.11×10^{-3})	33.900 (3.456)	

* ليس هناك تحديد دقيق لحد المرونة لحديد الزهر، ولكن يمكننا استخدام القيمة الموضوعة بكل أمان.

4

المحاور ومعادلاتها

المحاور وأعمدة الإدارة

إذا تعرض المحور لعزم أو قتل، فسيولد داخله إجهاد قص. ويتغير إجهاد القص هذا من القيمة صفر عند محور المحور إلى قيمة أعظمية عند السطح الخارجي أو أقصى ليف. وتعطى العلاقة بين العزم T pound-inches (KN.m) وإجهاد القص الأعظمي s (MPa) psi كما يلي:

$$T = s \frac{J}{c}$$

حيث

J هو عزم العطالة القطبي لمقطع المحور، in^4 (mm^4).

c يمثل المسافة من محور التعادل إلى أقصى ليف.

ومن أجل المحور الدائري المصمت فإن c تساوي نصف قطر المحور و:

$$J = \frac{\pi D^4}{32}$$

حيث يمثل D قطر المحور وبالتالي:

$$s_s = \frac{TD/2}{\pi D^4/32} = \frac{5.1T}{D^3}$$

وإذا كان المحور مفرغ فإن:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$$

حيث

d = نصف القطر الداخلي، وبالتالي:

$$s_s = \frac{5.17D}{D^4 - d^4}$$

وإذا أردت اختيار قطر المحور المصمت بعد معرفة العزم تستطيع استخدام العلاقة:

$$D = 1.723 \sqrt[3]{\frac{T}{s}}$$

حيث

s = إجهاد التصميم لمادة المحور، وإذا كانت لدينا الاستطاعة بالحصان البخاري وسرعة دوران المحور معروفة، فنستطيع عندها حساب قطر المحور من العلاقة:

$$D = 68.53 \sqrt[3]{\frac{H}{ns}}$$

وتستخدم للمحور المفرغ المعرض للفتل فقط المعادلة التالية:

$$\frac{T}{s} = \frac{D^3(1 - q^4)}{5.10}$$

حيث

q = النسبة بين القطر الداخلي والقطر الخارجي وبالتالي:

$$D = 1.723 \sqrt[3]{\frac{T}{s(1 - q^4)}}$$

الانحراف الزاوي الناتج عن العزم

عندما يقوم المحور بنقل عزم من طرف لآخر، فإنه سيحدث هناك دوران للمحور (الشكل 4.1). وتعطى الزاوية الكلية للدوران بالدرجات ومن أجل محاور دائري مصمت، المقطع نظامي بالعلاقة:

$$\theta = \frac{584LT}{GD^4}$$

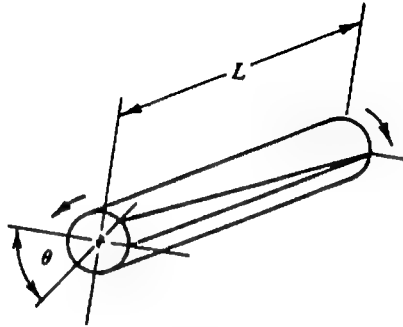
وإذا كان المحور مفرغ:

$$\theta = \frac{584LT}{G(D^4 - d^4)}$$

حيث

L = طول المحور، in (mm).

G = معامل الجساءة، psi (MPa).



الشكل 4.1 الانحراف الزاوي الناتج عن تطبيق عزم على محور آلة

المحاور في حالة الانحناء

إذا تم تطبيق عزم انحناء فقط على محور فإنه سيعامل كجائز. وإذا تعرض محور دائري مصمت لعزم انحناء M (KN.m) pound-inches، فيعطى عندها الإجهاد الأعظمي، ψ (MPa)، بالعلاقة:

$$s_f = \frac{32M}{\pi D^3}$$

ومن أجل محور مفرغ:

$$s_f = \frac{32M}{\pi D^3} \frac{1}{1 - C^4}$$

حيث:

$$C = \frac{d}{D}$$

المحاور المعرضة لعزم انحناء وقتل مركبين

لا تتعرض المحاور الناقلة للقذرة بواسطة السيور والمستنات والسلاسل إلى عزوم قتل فقط وإنما تتعرض لعزوم انحناء أيضاً. ولحساب تأثير الأحمال المركبة يتم استخدام نظرية إجهاد القص الأعظمي للمعادن المطيلية، واستخدام نظرية الإجهاد الناظمي الأعظمي للمعادن القصيفة.

ومن أجل الإجهاد الناظمي الأعظمي:

$$s_{f, \max} = \frac{s_f}{2} + \sqrt{s_s^2 + \frac{s_f^2}{4}}$$

حيث:

$s_{f, \max}$ - الإجهاد الناظمي الأعظمي، ψ (MPa).

s_t = إجهاد الشد، psi (MPa).

s_s = إجهاد القص، psi (MPa).

ومن أجل نظرية إجهاد القص الأعظمي:

$$s_{s,max} = \sqrt{s_s^2 + \frac{s_t^2}{4}}$$

حيث:

$s_{s,max}$ = إجهاد القص الأعظمي، psi (MPa). ولذلك ومن أجل المحاور الدائرية المقطع المصنعة تصبح المعادلة كما يلي:

$$s_{s,max} = \frac{5.1}{D^3} \sqrt{T^2 + M^2}$$

حيث

T = عزم الفتل lb.in (KN.m).

M = عزم الانحناء lb.in (KN.m).

ومن أجل المحاور المفرغة الدائرية المقطع:

$$s_{s,max} = \frac{5.1}{D^3} \sqrt{T^2 + M^2} \frac{1}{1 - C^4}$$

ويعطى إجهاد الشد الأعظمي الناتج عن الحمل المركب وفق نظرية الإجهاد الناظمي الأعظمي بالعلاقة:

$$s_{t,max} = \frac{s_t}{2} + \sqrt{s_s^2 + \frac{s_t^2}{4}}$$

والتي تصبح من أجل المحاور دائرية المقطع المصمتة:

$$s_{f,\max} = \frac{5.1}{D^3} (M + \sqrt{T^2 + M^2})$$

ومن أجل المحاور المفرغة دائرية المقطع:

$$s_{f,\max} = \frac{5.1}{D^3} \left(M + \sqrt{T^2 + M^2} \right) \left(\frac{1}{1 - C^4} \right)$$

يشير الحد $\sqrt{T^2 + M^2}$ غالباً إلى عزم اللي المكافئ، والذي يُعرّف كعزم قتل خيالي (غير حقيقي) والذي يحرّض (أو يعطي) نفس إجهاد القص في المحور كعزم مركب من عزم قتل فعلي وعزم انحناء فعلي.

وإذا تعرضت المحاور لحمولات مفاجئة فيجب ضرب العزم T و M بعامل من 1.5 إلى 2.0، اعتماداً على كبر الحمل المفاجئ المطبق، وتستخدم القيم الأعلى من أجل الحمولات الأكبر.

محاور نقل القدرة

تصنع المحاور من المعادن المطيلية وتصمم اعتماداً على المتانة باستخدام نظرية القص الأعظمي، ونفرض في المعادلات الآتية بأن المحاور مصنوعة من المعادن المطيلية وذات مقاطع دائرية. تتعرض محاور نقل القدرة عادة لحمولات قتل وانحناء وحمولات محورية. ويعطى إجهاد عزم القتل τ_{xy} لحمولات عزوم القتل كما يلي:

$$\tau_{xy} = \begin{cases} \frac{M_t r}{J} = \frac{16M_t}{\pi d^3} & \text{للمحاور المصمتة} \\ \frac{16M_t d_o}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} & \text{للمحاور المفرغة} \end{cases}$$

ومن أجل حمولات الانحناء يعطى إجهاد عزم الانحناء s_b (شد أو ضغط) كما يلي:

$$s_b = \begin{cases} \frac{M_b r}{J} = \frac{16M_b}{\pi d^3} & \text{للمحاور المصمتة} \\ \frac{32M_b d_o}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} & \text{للمحاور المفرغة} \end{cases}$$

ويعطى إجهاد الشد أو الضغط من أجل الحمولات المحورية كما يلي:

$$s_a = \begin{cases} \frac{4F_a}{\pi d^2} & \text{للمحاور المصمتة} \\ \frac{4F_a}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} & \text{للمحاور المفرغة} \end{cases}$$

وتعطى صيغة معادلة ASME للمحاور المفرغة التي تتعرض لحمولات قتل وانحناء وحمولات محورية عبر تطبيق معادلة إجهاد القص الأعظمي المعدلة بإدخال عوامل الصدم والتعب والأعمدة كما يلي:

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi s_s (1 - K^4)} \sqrt{\left[K_b M_b + \frac{\alpha F_a d_o (1 + K^2)}{8} \right]^2 + (K_t M_t)^2}$$

وتختزل صيغة معادلة ASME بالنسبة للمحاور المصمتة ذات الحمولات المحورية الخفيفة أو المعدومة كما يلي:

$$d^3 = \frac{16}{\pi S_s} \sqrt{(K_b M_b)^2 + (K_t M_t)^2}$$

حيث وعند المقطع المختار لدينا:

τ_{xy} = إجهاد قص عزم الفتل، psi (MPa).

M_t = عزم الفتل، in.lb(KN.m).

M_b = عزم الانحناء، in.lb(KN.m).

d_o = قطر المحور الخارجي، in (mm).

d_i = قطر المحور الداخلي، in (mm).

F_o = الحمل المحوري (القوة المحورية)، lb (KN).

$$K = \frac{d_i}{d_o}$$

K_b = عامل حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزم الانحناء (الانعطاف).

K_t = عامل حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزم الفتل.

وتعطي قيم عاملي حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزمي الفتل والانحناء في الجدول التالي:

الجدول 1.4

K_1	K_2	
		للمحاور الثابتة:
1.0	1.0	تطبيق الحمل بالتدرج
1.5 - 2.0	1.5 - 2.0	تطبيق الحمل بشكل مفاجئ
		للمحاور الدوارة:
1.0	1.5	تطبيق الحمل بالتدرج
1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	تطبيق الحمل بشكل مفاجئ (صدمة خفيفة)
1.5 - 3.0	2.0 - 3.0	تطبيق الحمل بشكل مفاجئ (صدمة شديدة)

S_0 = الإجهاد الناتج عن عزم الانحناء (شد أو ضغط)، (psi (MPa).

S_1 = الإجهاد الناتج عن القوة المحورية (الحمل المحوري) (شد أو ضغط)، (psi (MPa).

تخصص صيغة معادلة ASME للأعمدة المصنوعة في الفولاذ التجاري.

للمحاور غير الحوائية على مجاري خوابير $S_2 = 8000$ psi (المسموح به) S_2

للمحاور الحوائية على مجاري خوابير $S_2 = 6000$ psi (المسموح به) S_2

S_3 (الإجهاد المسموح به) = 30 % من حد المرونة ولكن ليس أعلى من 18 % من المتانة العظمى في حالة الشد للمحاور بدون مجاري خوابير، وتخفض هذه القيمة بنسبة 25 % في حالة وجود مجاري خوابير.

α = عامل توضع العمود، ويعتبر عامل توضع العمود واحد من أجل حمولة الشد، أما من أجل حمولات الضغط فيمكن حساب α من المعادلة التالية:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{1 - 0.0044(L/k)} & \text{من أجل } \frac{L}{k} < 115 \\ \frac{s_y}{\pi^2 n E} \left(\frac{L}{k} \right)^2 & \text{من أجل } \frac{L}{k} > 115 \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{من أجل لمهاتين بارزتين} \\ 2.25 & \text{من أجل لمهاتين مثبتتين} \\ 1.6 & \text{من أجل لمهاتين مقيدتين جزئياً كما في حالة المدرجات} \end{cases}$$

$$K = \text{نصف قطر الدوران} = \sqrt{\frac{I}{A}} \text{ ، in (mm)}$$

$$I = \text{عزم العطالة} \text{ ، in}^4 \text{ (mm}^4\text{)}$$

$$A = \text{مساحة مقطع المحور} \text{ ، in}^2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S_y = \text{إجهاد حد الخضوع في حالة الضغط} \text{ ، psi (MPa)}$$

جساءة الفتل

يعتمد تصميم المحاور وفق جساءة الفتل على زاوية الفتل المسموح بها، وتعتمد زاوية الفتل المسموح بها بدورها على التطبيق العملي، وتغير بحوالي 0.08 درجة لكل قدم (0.3 m)، من أجل المحاور المستخدمة في آلات التشغيل، حوالي 1.0° لكل قدم (0.3 m) من أجل أعمدة المناولة العلوية:

$$\theta = \begin{cases} \frac{584 M_f L}{G(d_o^4 - d_i^4)} & \text{للمحاور ذات المقاطع الدائرية المفرغة} \\ \frac{584 M_f L}{G d^4} & \text{للمحاور ذات المقاطع الدائرية المصمتة} \end{cases}$$

حيث

θ = زاوية الفتل، deg.

L = طول المحور، in (mm).

M_t = عزم الفتل، in.lb (KN.m).

G = معامل المرونة لعزم الفتل (MPa).

d = قطر المحور، in (mm).

الجبساء الجانبية

يعتمد تصميم المحاور وفق الجبساء الجانبية على الإزاحة العرضية المسموح بها لحاوية المدرج العامل، وعلى دقة أداء آلة التشغيل، وعلى الأداء المرضي للمسكن، وعلى توضع المحور، ومتطلبات مشابهة أخرى. وتحدد قيمة الإزاحة عبر إجراء التكامل مرتين للعلاقة:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_b}{EI}$$

حيث

M_b = عزم الانحناء (الانعطاف)، in.lb (KN.m).

E = معامل المرونة، psi (MPa).

I = عزم العطالة، in⁴ (mm⁴).

إذا كان المحور مؤلف من مقاطع مختلفة فنقوم عملياً بإجراء حل بياني للمعادلة السابقة.

العزم

يعتبر عزمي الفتل والانحناء هما العاملين الرئيسيين المؤثرين على تصميم المحور، وتكمن الخطوة الأولى في عملية تصميم المحور في رسم مخطط عزم الانحناء للمحور المحمل، أو مخطط عزم الانحناء المركب إذا كانت الحملات المؤثرة على المحور واقعة في أكثر من مستوى، وعندها يمكن تحديد النقاط ذات إجهاد الانحناء الحرج من مخطط العزم.

يمكن تحديد عزم الفتل المؤثر على المحور من العلاقة التالية:

$$M_t = \frac{\text{hp} \times 33,000 \times 12}{2, \pi \text{ rpm}} = \frac{63,000 \times \text{hp}}{\text{rpm}} \quad \text{in.lb (kN.m)}$$

ويحدد العزم عند استخدام القيادة بالسيور بالعلاقة:

$$M_t = (T_1 - T_2) R \quad \text{in.lb (kN.m)}$$

حيث

T_1 = قوة الشد على الجانب المشدود من القشاط (السير) على البكرة، lb (KN).

T_2 = قوة الشد على الجانب غير المشدود من القشاط على البكرة، lb (KN).

R = نصف قطر البكرة، in (mm).

ومن أجل القيادة بالمسننات يحدد العزم كما يلي:

$$M_t = F_t R$$

حيث F_t = القوى المماسية على نصف القطر الخطوي، lb (KN).

R = نصف القطر الخطوي، in (mm).

السرعة الحرجة

عندما يكون المحور خاضع لحمل مركز متوضع على أي نقطة من طوله، نستطيع تحديد السرعة الحرجة له بالعلاقة:

$$N_c = \frac{188}{\sqrt{Y}}$$

حيث

N_c = السرعة الحرجة، rpm.

Y = انحراف المحور، in (mm).

ويتم إيجاد انحراف المحور عبر استخدام طرق القضبان.

إذا كان المحور مصنوعاً من الفولاذ وذو مقطع دائري مصمت ومسند بواسطة مدحرجين قليلي السماكة أو بمدحرجات ذات تراصف تلقائي فتصبح معادلة السرعة الحرجة كما يلي:

$$N_c = 387,000 \frac{D^2}{ab} \sqrt{\frac{L}{P}}$$

حيث

D = القطر in (mm).

L = المسافة بين مدحرجات الإسناد، in (mm).

P = الحمل، lb (Kg).

a و b هما المسافة بين الحمل والمدحرجين، in (mm).

إذا كان المحور مثبت بشكل جاسيء بمدحرجات طويلة:

$$N_c = 387,000 \frac{D^2 L}{ab} \sqrt{\frac{L}{Pab}}$$

وحتى نستطيع تطبيق هذه المعادلات يجب أن يكون المحور ذو قطر منتظم والأكتاف والتتواتر صغيرة بحيث يمكن إهمالها، وإذا كان وزن المحور صغير نسبياً فيمكن إهماله عادةً، وإذا أردنا إدخاله فنقوم بإضافة نصف الوزن إلى الحمل المطبق.

ويجب أن لا تزيد سرعة عمل المحور الأعظمية عن 80 % من السرعة الحرجة. وتعطى السرعة الحرجة للمحاور ذات المقاطع الثابتة والمسندة إسناداً بسيطاً عند نهايتها، مع عدم وجود كتلة مضافة إلى كتلة المحور نفسه بالعلاقة التالية:

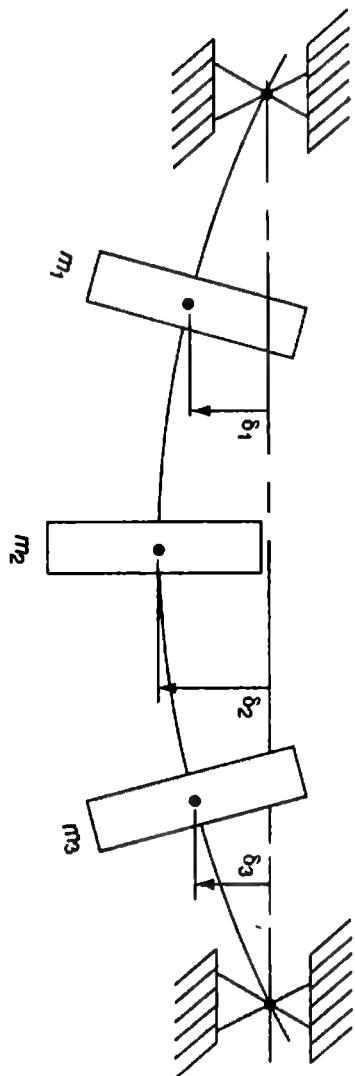
$$\omega_c = \sqrt{\frac{5}{4} \frac{g}{\delta(\max)}} \quad \text{rad/unit time}$$

$\delta(\max)$ تمثل الانحراف الستاتيكي الأعظمي الناتج عن الحمل الموزع بانتظام والمساوي لوزن المحور.

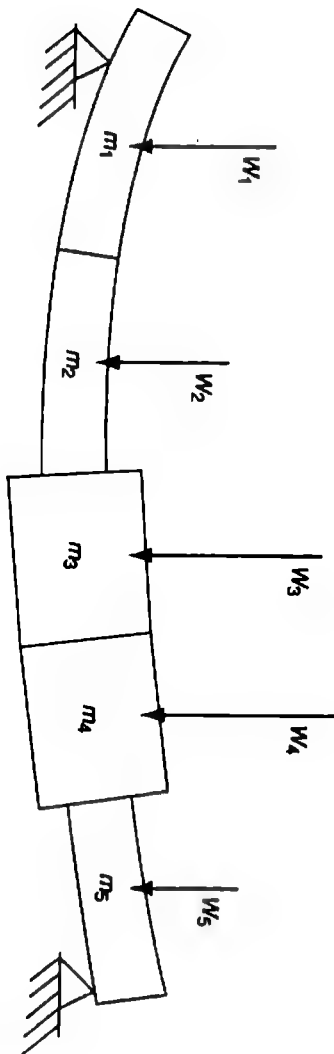
g يمثل ثابت الجاذبية (386 in/s^2 أو 32.2 ft/s^2).

ومن أجل محور مهمل الكتلة يحمل عدة كتل مركزة (انظر الشكل 4.2) تعطى السرعة الحدية الأولى بشكل تقريبي بالعلاقة:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g \sum_1^j W_n \delta_n}{\sum_1^j W_n \delta_n^2}} \quad \text{معادلة Rayleigh - Ritz}$$



الشكل 4.2 : محور مهمل الكتلة يعمل عدة كل مركزه



الشكل 4.3 : خور ذو كل موزعة

حيث

$$W_n = \text{وزن الكتلة } n.$$

$$\delta_n = \text{التدلي الستاتيكي عند الكتلة } n.$$

$$z = \text{العدد الكلي للكتل.}$$

يمكن استخدام نفس المعادلة لتقدير السرعة الحدية الأولى لمحور ذو كتلة موزعة.

(راجع الشكل 4.3). حيث قمنا بتقسيم الكتلة الموزعة إلى عدد من القطع m_1 و m_2 و m_3 الخ. مركزين كل كتلة منتظمة في مركز ثقلها.

تُعطى معادلة Dunkerley والتي هي تقريب آخر للسرعة الحدية الأولى لنظام متعدد الكتل كما يلي:

$$\frac{1}{\omega_c^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \frac{1}{\omega_3^2} + \dots \quad \text{معادلة Dunkerley}$$

حيث تمثل

ω_c السرعة الحدية الأولى لنظام متعدد الكتل.

ω_1 السرعة الحدية فيما لو كانت الكتلة 1 موجودة فقط.

ω_2 السرعة الحدية فيما لو كانت الكتلة 2 موجودة لوحدها فقط. الخ.

إن من المفيد أن نذكر بأن معادلتَي Rayleigh-Ritz و Dunkerley هما معادلتان تقريبيتان للتردد الطبيعي الأول للاهتزاز، والذي من المفترض أن يكون قريباً من السرعة الحدية الأولى للدوران. وبشكل عام تزيد معادلة Rayleigh-Ritz من تقدير التردد الطبيعي، بينما معادلة Dunkerley تبخس من تقدير التردد الطبيعي.

المعادلات التجريبية لمحاور نقل القدرة المصنوعة من الفولاذ

تستخدم عدة معادلات تجريبية لمحاور نقل القدرة المصنوعة من الفولاذ، وتحتوي معظمها على واحد أو أكثر من عوامل تجريبية.

من أجل المحاور المصمتة:

D = القطر الخارجي للمحور، (mm) in.

T = عزم الفتل الأعظمي، (N.m) lb (in).

B = عزم الانحناء الأعظمي، (N.m) lb (in).

K_t = عامل الخدمة ويطبق على العزم T ، يتراوح بين 1.0 و 2.0.

K_b = عامل الخدمة ويطبق على العزم B ، يتراوح بين 1.0 و 2.5.

π = ثابت، 3.1416.

hp = الاستطاعة المنقولة (KW).

R = دورة في الدقيقة.

S = إجهاد العمل المسموح به، (MPa) psi.

ويحسب قطر المحور المعرض لعزم مركب من عزم انحناء وعزم فتل بالعلاقة:

$$D = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi S c} \sqrt{(K_t T)^2 + (K_b B)^2}}$$

أو

$$\sqrt[3]{\frac{16}{\pi S c} \sqrt{\left(\frac{396,000 K_t hp}{2\pi R}\right)^2 + (K_b B)^2}}$$

ومن أجل حمولة عزم انحناء فقط:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32K_b B}{\pi S_b}} \quad K_b B = \frac{\pi}{32} S_b D^3 = 0.09817 S_b D^3$$

ومن أجل حمولة عزم قتل فقط:

$$D = \sqrt[3]{\frac{321,000 K_t hp}{S_t R}} \quad K_t T = 0.1963 S_t D^3$$

$$K_t (hp) = \frac{S_t D^3 R}{321,000}$$

ومن أجل المحاور المفرغة المكافئة، قم بإيجاد القطر D للمحور المصمت واضربه بالقيمة $\sqrt[4]{1-K^4}$ لإيجاد القطر الخارجي للمحور المفرغ المكافئ لأي نسبة تصميم K، حيث يمثل D₁ القطر الداخلي للمحور المفرغ و K نسبة القطر الداخلي إلى القطر الخارجي = $\frac{D_1}{D}$.

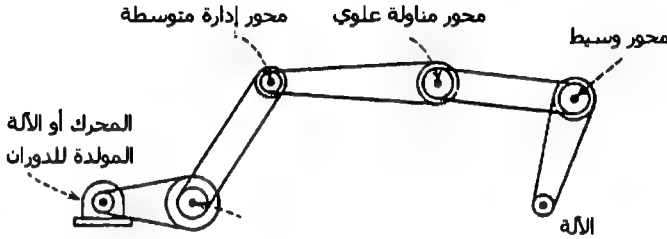
الأنظمة ذات محاور نقل القدرة المتعددة

يبين الشكل 4.4 أسماء وتوضع المحاور المختلفة المستخدمة في نظام متعدد المحاور المقاد عبر السيور أو السلاسل أو كليهما.

المحاور القائدة

الموضع: أول محور من جهة المحرك أو الآلة المولدة للدوران.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي من 25 إلى 550 دورة بالدقيقة.



الشكل 4.4 : نظام يستخدم محاور نقل قدرة متعددة

المعادلة:

$$hp = \frac{D^3 R}{125}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{125 \times hp}{R}}$$

حيث

hp = الاستطاعة، (KW).

D = قطر المحور، in (mm).

R = سرعة الدوران، rpm.

125 = ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم قتل وانحناء وهو 2800 psi (19.3 MPa).

محاور المناولة العلوية

التوضيح: يمكن أن تكون أول محور بعد المحرك أو أول محور أو ثاني محور من المحاور القائدة.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي لهذه المحاور بين 70 إلى 400 rpm.
المعادلة:

$$hp = \frac{D^3 R}{100}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{100 \times hp}{R}}$$

حيث

hp = الاستطاعة (KW).

D = قطر المحور، in (mm).

R = سرعة الدوران، rpm.

100 = ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم القتل والانحناء
وهو 3200 psi (22.1 MPa).

محاور إدارة متوسطة

التوضيح: إما بين المحاور القائدة ومحاور المناولة العلوية، أو بين محاور المناولة العلوية والمحاور الوسيطة.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي لسرع هذه المحاور بين 100 و 400 rpm.
المعادلة: نفس المعادلة لمحاور المناولة العلوية.

المحاور الوسيطة

التوضيح: تتوضع عادةً بين محاور المناولة العلوية والجزء الدوار من الآلة.
السرعات: يتراوح المجال الصناعي لسرع هذه المحاور بين 100 و 600 rpm.

المعادلة: من أجل تحميل وعمل متوسطين:

$$hp = \frac{D^3 R}{80}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{80 \times hp}{R}}$$

حيث

hp - الاستطاعة (KW).

D - قطر المحور، (mm) in.

R - سرعة الدوران، rpm.

80 - ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم فتل وانحناء بقيمة 3600 psi (24.8 MPa).

يعطي الجدول التالي معادلات زاوية الدوران الناتجة عن الفتل θ للمحاور ذات المقاطع المختلفة:

الجدول 4.2 : المعادلات المعبرة عن زاوية الفتل الناتجة عن العزم כתابعة للمقطع




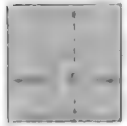
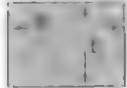
θ - زاوية الفتل، راديان

T - عزم الفتل، (N.m) lb.in

L - طول المحور، (mm) in




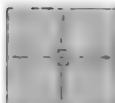
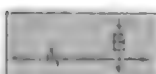
N - معامل الجساءة (MPa) psi

D, d_o , d_i , d_m , d_s , a, b = أبعاد مقاطع المحور، (mm) in

مقطع المحور	θ زاوية الفتل الناتجة عن العزم
	$\frac{32TL}{\pi D^3N}$
	$\frac{32TL}{\pi(d_o^4 - d_i^4)N}$
	$\frac{16(d_m^2 + d_n^2)TL}{\pi d_m^3 d_n^3 N}$
	$\frac{7.11TL}{s^3N}$
	$\frac{3.33(a^2 + b^2)TL}{a^3b^3N}$

بينما يعطي الجدول التالي معادلات عزم الفتل للمحور مع مواضع إجهاد القص الأعظمي في المحور.

الجدول 4.3 : معادلات عزم الفتل للمحاور ومواضع إجهاد القص الأعظمي في كل محور

مقطع المحور	موضع إجهاد القص الأعظمي	معادلات عزم الفتل T
	أبعد ليف	$\frac{\pi D^3 f}{16}$
	أبعد ليف	$\frac{\pi}{16} \frac{(d_o^4 - d_i^4)}{d_o} f$
	لهايتي المحور الرئيسي	$\frac{\pi d_o d_i^2 f}{16}$
	منتصف الأضلاع	$0.208 A^3 f$
	نقطة منتصف الضلع الرئيسي	$\frac{A^2 B^2 f}{3A + 1.8B}$

ملاحظة : f هي إجهاد القص الأعظمي (MPa) psi.

الحدافات على المحاور (الدولاب المعدل)

نتج بعض مصادر الاستطاعة - مثل محركات الاحتراق الداخلي - القدرة خلال جزء صغير من دورتها. لذلك نستخدم الحدافات (الدولاب المعدلة) لتنعيم خرج هذه التقلبات وجعل تدفق القدرة أكثر انتظاماً.

تعطى الطاقة الحركية (KE) للحدافات كما يلي:

$$KE = \frac{Wv^2}{2g}$$

حيث

KE = الطاقة الحركية، ft.lb (KN.m).

W = وزن الحدافة، lb (Kg).

v = سرعة مركز الكتلة، ft/s (m/s).

g = ثابت الجاذبية الأرضية، ft/s² (m/s²).

يعتمد التغير المقبول في السرعة الزاوية على المنشأة أو التطبيق الذي ستوضع فيه الحدافة، ويستخدم عامل التنظيم لتحديد قيمة (أو مجال) تغير السرعة الزاوية، والذي يعطى كما يلي:

$$C_f = \frac{v_1 - v_2}{v}$$

حيث

C_f = عامل التنظيم.

$$\Delta KE = \frac{WC_f v^2}{g}$$

إذا كانت سماكة الإطار مهملة بالنسبة للقطر (كما هو في الحالة المعتادة) فيمكن اعتبار مركز الإطار هو مركز الكتلة.

ويؤخذ تسارع الجاذبية الأرضية عادة بقيمة 32.2.

$$W = \frac{32.2 \Delta KE}{C_f v^2}$$

حيث

W = وزن الإطار، lb (Kg).

v = متوسط سرعة مركز الإطار ft/s (m/s).

المحاور العمودية الخاصة بالمزج أو أوعية الخلط

معادلة الاستطاعة بالحصان البخاري

$$\frac{WV^2}{550 G} = \text{الاستطاعة المطلوبة}$$

حيث

W = الوزن الكلي المراد خلطه أو مزجه.

V = السرعة، ft/s (تشكل القطر الرئيسي للمحرك).

G = ثابت الجاذبية الأرضية أو 32.2.

لاحظ بأن: الاستطاعة بالحصان البخاري $KW = 0.746 \times (hp)$.

وسنورد الآن جدولاً بخواص المواد التي تصنع منها المحاور:

نسبة الاستعانة	حد الزرنية (MN/m ²) (kgf/cm ²)			الحانة القصوى (MN/m ²) (kgf/cm ²)			نسبة الكربون	المعدن
	قص	ضغط	شد	قص	ضغط	شد		
35	122.5 (12.5)	241.0 (24.6)	241.0 (24.6)	241.0 (24.6)	482.0 (49.2)	482.0 (49.2)	0.10-0.25	دائبة تجارية على البارد
35	103.0 (10.5)	206.0 (21.0)	206.0 (21.0)	206.0 (21.0)	412.0 (42.0)	412.0 (42.0)	0.10-0.25	حراطة تجارية
26	113.0 (11.5)	245.0 (25.0)	245.0 (25.0)	225.0 (23.0)	451.0 (46.0)	451.0 (46.0)	0.15-0.25	دائبة أو تشكّل على الساخن
24	121.0 (12.3)	275.0 (28.0)	275.0 (28.0)	241.0 (24.6)	482.0 (49.2)	482.0 (49.2)	0.25-0.35	
22	130.0 (13.2)	314.0 (32.0)	314.0 (32.0)	260.0 (26.5)	520.0 (53.0)	520.0 (53.0)	0.35-0.45	
20	138.0 (14.1)	345.0 (35.2)	345.0 (35.2)	276.5 (28.2)	553.0 (56.4)	553.0 (56.4)	0.45-0.55	
26	147.0 (15.0)	382.0 (39.0)	382.0 (39.0)	294.0 (30.0)	588.0 (60.0)	588.0 (60.0)	0.15-0.25	Nickel 3 1/2%
25	155.0 (15.8)	414.0 (42.2)	414.0 (42.2)	310.0 (31.6)	620.0 (63.2)	620.0 (63.2)	0.25-0.35	Chrome Vanadium ...

المطوّل 4.4 : خواص مواد الحاور

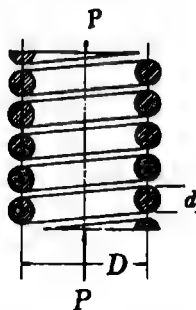
5

عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية

النوابض

النوابض الحلزونية

من أجل نوابض الشد أو الضغط الحلزونية:



الشكل 5.1 : نابض ضغط حلزوني

$$\tau = \frac{8PD}{\pi d^3}$$

$$P = \frac{\pi d^3 \tau}{8D}$$

$$\delta = \frac{8PD^3 n}{Gd^4}$$

$$\delta = \frac{\pi D^3 n \tau}{Gd}$$

$$P = \frac{Gd^4 \delta}{8D^3 n}$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8D^3n}$$

$$\tau = K\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3}$$

$$\tau' = K\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3}$$

$$K = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}$$

$$c = \frac{D}{d} = \text{دليل النابض}$$

حيث:

P = الحمل على النابض.

d, D = قطري السلك واللفات.

δ = الانحراف.

τ = إجهاد القص غير المصحح.

$\tau' = K\tau$ = إجهاد القص المصحح.

K = عامل تصحيح الانحناء (يعطى في المراجع الهندسية).

n = عدد اللفات الفعالة في النابض.

$k = \frac{P}{\delta}$ = صلابة النابض.

ومن أجل نوابض الضغط ذات النهايات الممنوعة من الالتفاف أثناء الانحراف، يعطى التمدد في القطر خلال الانضغاط من الحالة الحرة إلى الارتفاع الصلب كما يلي:

$$\Delta D = 0.05 \frac{p^2 - d^2}{D}$$

حيث

P = الخطوة - أو المسافة من المركز إلى المركز - عند الارتفاع الحر، وإذا كانت النهايتين حرتين في الالتفاف يصبح التمدد في القطر كما يلي:

$$\Delta D = 0.10 \frac{p^2 - 0.8pd - 0.2d^2}{D}$$

التحميل الجانبي لنوابض الضغط

تتعرض النوابض الحلزونية - وخاصة تلك التي تستخدم كعازلات اهتزاز - إلى تحميل جانبي بقوة F أثناء انضغاطها بقوة عمودية P ، وتصبح في هذه الحالة المقاومة الوحيدة للتحميل الجانبي هي صلابة النابض (الشكل 5.2).

ومن أجل النوابض الفولاذية ذات الأسلاك الدائرية المقطع - وإذا كان $E = 30 \times 10^6$ psi (206.9 GPa) و $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) - تعطى الصلابة k_x في الاتجاه العرضي بالمعادلة:

$$k_x = \frac{F}{\delta_x} = \frac{10^6 d^4}{C_1 n D (0.204 h_s^2 + 0.265 D^2)}$$

حيث

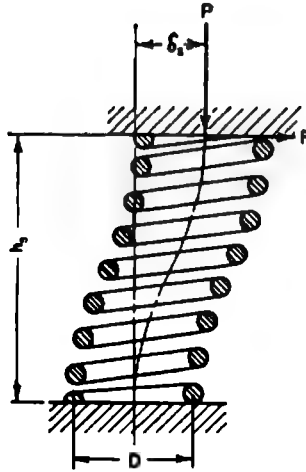
δ_x = الانحراف الجانبي الناتج عن القوة F .

l_0 = الطول الحر.

h_s = مقدار انضغاط النابض = δ_u - .

δ_u = الانحراف الشاقولي الناتج عن الحمل P .

C_i = عامل يعتمد على النسبتين $\frac{\delta_{st}}{l_o}$ و $\frac{l_o}{D}$ ، وتؤخذ قيم هذا العامل من مخططات موجودة في المراجع الهندسية.



الشكل 5.2 : نابض خاضع لحمل مركب عمودي وجانبي (احدى نهايتيه مثبتة والثانية مقادة (موجهة)).

تعطى نسبة الصلابة المحورية $k_y = P/\delta_{st}$ إلى الصلابة الجانبية k_x للنوابض الفولاذية ذات الأسلاك الدائرية المقطع حيث $E = 30 \times 10^6 \text{ psi}$ (206.9 GPa) و $G = 11.5 \times 10^6 \text{ psi}$ (79.3 GPa) بالعلاقة التالية:

$$\frac{k_y}{k_x} = 1.44 C_i \left(0.204 \frac{h^2}{D^2} + 0.265 \right)$$

وتصلح هذه المعادلة أن تطبق على النوابض المصنوعة من مواد أخرى تملك النسبة $\frac{E}{G}$ مساوية تقريباً 2.6.

الترددات الطبيعية: يعطى التردد الطبيعي f_n مقدراً بدورة كل ثانية أو بالهرتز (Hz) للنوابض الحلزونية المحصورة بين صفيحتين متوازيتين بالعلاقة:

$$f_n = \frac{2d}{\pi D^2 n} \sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}}$$

حيث

n = عدد اللفات الفعالة.

g = تسارع الجاذبية الأرضية.

وتصبح هذه المعادلة من أجل النوابض الفولاذية مقموطتي النهاية وتملك $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) و $\gamma = 0.285$ lb/in³ (0.008 Kg/cm³) بالشكل التالي:

$$f_n = \frac{14,000d}{D^2 n}$$

وتكون ترددات الأنماط الأعلى للاهتزاز عبارة عن الأمثال 2 و 3 و 4 ... الخ من هذا التردد.

تأثير الصدم: إذا تعرضت إحدى نهايتي نابض حلزوني طويل مسبق الضغط أو حر لانضغاط مفاجئ عبر كتلة ثقيلة متحركة بسرعة v ، فستحدث عندها موجة اندفاع منتشرة على طول سلك النابض بسرعة v_s ، حيث:

$$v_s = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{gG}{2\gamma}}$$

ومن أجل فولاذ عموك $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) و $g = 386$ in/s (980.4 cm/s).

$$\gamma = 0.283 \text{ lb/in}^3 \text{ (7833 kg/m}^3\text{)}$$

$$v_s = \frac{88,560d}{D} \text{ in/s (cm/s)}$$

ويعطى الزمن اللازم لانتشار هذه الموجة على كامل طول سلك النابض بالعلاقة:

$$t_s = \frac{\pi n D}{v_s} s$$

وتعطى الزيادة في إجهاد القص غير المصحح $\Delta\tau$ ، عندما تتعرض إحدى نهايتي نابض طويل لانضغاط مفاجئ بسرعة v بالعلاقة:

$$\Delta\tau = v \sqrt{\frac{2\gamma G}{g}}$$

ومن أجل النوابض الفولاذية التي تملك $G = 11.5 \times 10^6 \text{ psi (79.3 GPa)}$ و $\gamma = 0.285 \text{ lb/in}^3 \text{ (7888 Kg/m}^3\text{)}$

$$\Delta\tau = 130 v$$

حيث تعطى السرعة v بالإنش لكل ثانية (cm/s) و $\Delta\tau$ (MPa) .psi. مما يعني بأن $\Delta\tau$ لا تتعلق بأبعاد النابض.

وتعطى الزيادة المطابقة في الحمل ΔP والانحراف لكل لفة $\Delta\delta$ بالعلاقتين:

$$\Delta P = \frac{\pi v d^3}{8D} \sqrt{\frac{2\gamma G}{g}}$$

$$\Delta\delta = \frac{\pi v D^2}{d} \sqrt{\frac{2\gamma}{gG}}$$

ومن أجل النوابض الفولاذية، وعندما تعطى ΔP بواحدات (N) lb، و $\Delta\delta$ بواحدات in (cm) والسرعة v بواحدات in/s (cm/s) تصبح كما يلي:

$$\Delta P = \frac{51d^3v}{D}$$

$$\Delta\delta = \frac{D^2v}{d}(35.5 \times 10^{-6})$$

نوابض الشد الحلزونية

تعطى المعادلات التقريبية لنوابض الشد ذات نصف حلقة معدّلة لتشكل نهاية الروشعة (الشكل 5.3) بالشكل:

$$\frac{PD}{2} = A' \text{ عند الانحناء عند } A'$$

حيث

D = قطر اللفة الوسطي.

$$\frac{16PD}{\pi d^3} = A' \text{ وإجهاد الانحناء الاسمي عند } A'$$

حيث

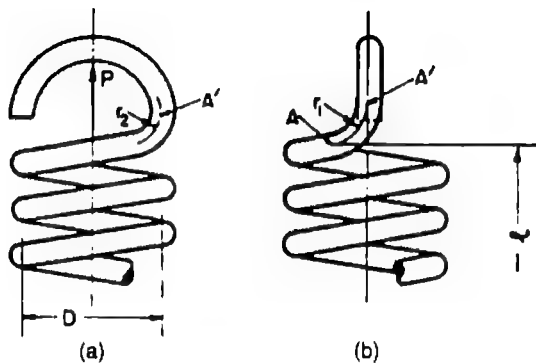
d = قطر السلك.

$$\frac{8pD}{\pi d^3} \text{ وإجهاد الشد الاسمي الناتج عن عزم الفتل}$$

ويعطى إجهاد الانحناء الأعظمي σ عند النقطة A' (عند بداية الانحناء) بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{16PD}{\pi d^3} K_1 + \frac{4P}{\pi d^2}$$

حيث تقترح النسبة $K_1 = \frac{r_o}{r_i}$ (حيث يمثل r_o و r_i نصفَي القطر الوسطي والداخلي على الترتيب) من قبل الهيئة ASM لإجراء حسابات الإجهاد الناتج عن الانحناء.



الشكل 5.3 : نابض شد مع نصف حلقة معدلة لتشكيل نهاية الوشيعية

وسيعطى الإجهاد الأعظمي τ_1 الناتج عن عزم الفتل $P.r$ بشكل تقريبي بالعلاقة:

$$\tau_1 = \frac{8PD}{\pi d^3} \frac{4c_1 - 1}{4c_1 - 4}$$

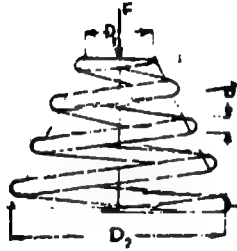
تعتمد قيمة الشد الابتدائي التي يمكن وضعها ضمن نابض شد بشكل رئيسي على دليل النابض $\frac{D}{d}$ ، وبشكل عام كلما كبر دليل النابض كلما صغرت حمولات الشد الابتدائية. وتعطى قيم حمولة الشد الابتدائية P_1 والتي يمكن الحصول عليها عملياً بالعلاقة:

$$P_1 = \frac{\pi \tau d^3}{8D}$$

حيث

τ = إجهاد الفتل غير المصحح الناتج عن الشد الابتدائي. وتؤخذ هذه الإجهادات τ والتي تحدد عملياً من المراجع الهندسية.

النوابض المخروطية



الشكل 5.4 : نابض مخروطي

يعطى الانحراف المحوري للنابض المخروطي المصنوع من سلك دائري المقطع بالعلاقة:

$$Y = \frac{2iF(D_2^3 + D_2^2 D_1 + D_2 D_1^2 + D_1^3)}{d^4 G}$$

حيث

Y = الانحراف أو مقدار الانضغاط، (mm).

i = عدد اللفات الفعالة للنابض.

F = الحمل المحوري، N.

D_2 = قطر النابض عند قاعدته، mm.

D_1 = قطر النابض عند قمته، mm.

d = قطر سلك النابض، mm.

G = عامل الجساءة.

كما يعطى الانحراف المحوري للنايـض المخروطي المصنوع من سلك مستطيل المقطع بالعلاقة:

$$y = \frac{0.716F(b^2 + h^2)(D_2^3 + D_2^2 D_1 + D_2 D_1^2 + D_1^3)}{b^3 h^3 G}$$

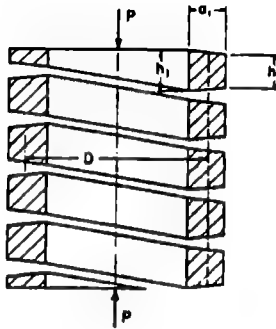
حيث:

b = السماكة وفق الاتجاه القطري، mm. تُعرّف

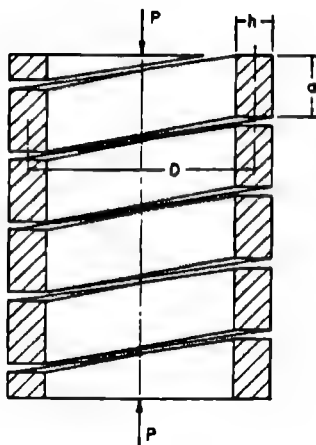
h = السماكة وفق الاتجاه المحوري، mm، وباقي المتحولات كما في العلاقة السابقة.

النوابض الحلزونية ذات الأسلاك المربعة والمستطيلة

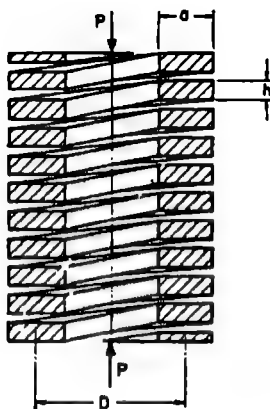
يظهر الشكلان 5.5 و 5.6 النوابض ذات الأسلاك مربعة ومستطيلة المقطع. ويمكن تقدير مقدار الفلطحة الناتجة عن لف الأسلاك مربعة أو مستطيلة المقطع بالطرق على الساخن بالعلاقة:



الشكل 5.5 : نايـض حلزوني ذو سلك مربع المقطع بتحميل محوري. (لاحظ بأن المقطع أصبح شبه منحرف خلال عملية اللف).



الشكل 5.6 : نابض حلزوني ذو سلك مستطيل المقطع والضلع الكبير مواز لمحور النابض



الشكل 5.7 : نابض حلزوني ذو سلك مستطيل المقطع ملفوف وفق الضلع الأكبر للمستطيل

$$h_1 = h \left[1 + \frac{k(D_o - D_i)}{D_o + D_i} \right]$$

حيث

D_o, D_i = قطري النابض الخارجي والداخلي على الترتيب.

h = السماكة الأصلية.

h_1 = السماكة بعد الفلطة (الشكل 5.5).

$K = 0.3$ للنوابض الملفوفة على البارد.

$K = 0.4$ للنوابض الملفوفة على الساخن والمواد المدنة.

الإجهاد غير المصحح: نستطيع الحصول على الإجهاد غير المصحح τ في النوابض ذات الأسلاك مربعة المقطع عبر افتراض أن السلك يتصرف كقضيب مستقيم تحت عزم الفتل. وبالتالي نحصل على:

$$\tau = \frac{2.4PD}{a^3}$$

حيث:

P = الحمل.

D = قطر اللف الوسطي.

a = طول ضلع مقطع السلك المربع.

حيث سيصبح المقطع على شكل شبه منحرف (الشكل 5.5)، وبالتالي ستؤخذ قيمة a كقيمة وسطية كما يلي: $(2a_1 + h_1 + h_2)/4$

الإجهاد المصحح: يعطى الإجهاد المصحح (والذي يتضمن تأثيرات اللف واتجاه القص وتلك المستخدمة لحساب مجال حملات التعب) بالمعادلة التالية:

$$\tau' = K' \tau$$

$$K' = 1 + \frac{1.2}{c} + \frac{0.56}{c^2} + \frac{0.5}{c^3}$$

ويمثل c دليل النابض $\frac{D}{a_1}$ أو $\frac{D}{a}$. c يعطى عامل تصحيح الانحناء K' في المراجع الهندسية.

وهذا العامل أخفض بقليل من العامل K الخاص بالأسلاك دائرية المقطع ويطبق عندما يكون العامل $c = \frac{D}{a}$ أكبر من 3.

الانحراف (التشوه): يعطى الانحراف δ في النابض الحلزوني ذو السلك مربع المقطع بالعلاقة:

$$\delta = \frac{5.59PD^3n}{Ga^4}$$

حيث

n = عدد اللفات الفعالة.

G = عامل الجساءة. وتعطى هذه المعادلة خطأ نظرياً حوالي (2 - 4) % للنوابض التي يقع دليلها بين 3 و4، ولكنها دقيقة لمعظم الحالات العملية.

ونستطيع الحصول على نتائج أدق عبر استخدام العلاقة:

$$\text{نسبة النابض} = \frac{P}{\delta} = \frac{Ga^4}{5.59D^3n}$$

الإجهاد غير المصحح: يعطى الإجهاد غير المصحح للنوابض ذات الأسلاك مستطيلة المقطع (الشكل 5.5 و 5.6) بالعلاقة التالية:

$$\tau = \frac{PD}{k_1 a h^2}$$

حيث

a = الضلع الأطول من مقطع السلك.

h = الضلع الأقصر من مقطع السلك.

k_1 = عامل يعتمد على النسبة $\frac{a}{h}$ وهو معطى في المراجع الهندسية.

ويعطى الإجهاد المصحح τ' بالعلاقة:

$$\tau' = \beta \frac{PD}{ab\sqrt{ab}}$$

حيث يؤخذ العامل β من المراجع الهندسية.

الانحراف (لنوابض ذات الدليل الكبير): من أجل النوابض ذات الأدلة الكبيرة $\frac{D}{a}$ أو $\frac{D}{h}$ ، بحسب الانحراف δ عبر الافتراض بأن النابض يتصرف مثل قضيب مستقيم، يبعدين a و h متعرض لعزم قتل $\frac{PD}{2}$ ، وبالتالي نحصل على العلاقة:

$$\delta = \frac{PD^3 n}{k_2 a h^3 G}$$

حيث

n = عدد اللفات الفعالة.

G = عامل الجساءة.

k_2 = عامل يتعلق بالنسبة $\frac{a}{h}$ يؤخذ من المراجع الهندسية.

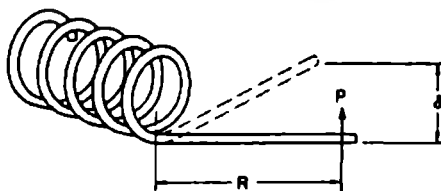
لاحظ بأن $h < a$.

يعطى ثابت صلابة النابض أو النسبة k بواحدات lb/in (Kg/cm) بالعلاقة:

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{a^2 b^2 G}{D^3 m \gamma}$$

نوابض الفتل الحلزونية

النوابض ذات الأسلاك دائرية المقطع. تصمم هذه النوابض عملياً عبر الافتراض بأن النابض سيضغط عبر العزم M المتوضع وفق محور الحلزون. وتطبق العلاقات التالية على النوابض ذات الأسلاك دائرية المقطع (الشكل 5.8):



الشكل 5.8 : الطريقة النموذجية لتحميل نابض الفتل

$$\sigma = \frac{10.2M}{d^3}$$

$$\sigma' = K_1 \sigma = K_1 \frac{10.2M}{d^3}$$

يؤخذ العامل K_1 هنا كتابع للنسبة $\frac{D}{d}$ ، ويعطى الانحراف الزاوي ϕ بالدورات والنتائج عن العزم M بالعلاقة:

$$\varphi = \frac{10.2MnD}{Ed^4} \quad \text{دورة}$$

ويعطى الانحراف الزاوي φ_1 بالدرجات والناتج عن العزم M بالعلاقة:

$$\varphi_1 = \frac{3670MnD}{Ed^4} \quad \text{درجة}$$

ويعطى ثابت صلابة النابض k بوحدة $\left(\frac{Cm.N}{deg}\right) \frac{in.lb}{deg}$ بالعلاقة:

$$k = \frac{M}{\phi_1} = \frac{Ed^4}{3670nD}$$

ويعطى الطول الفعلي للسلك المطلوب l بالعلاقة:

$$l = \frac{Ed^4}{1170k}$$

حيث

σ و σ' = الإجهاد غير المصحح والمصحح على التوالي.

D و d = قطر اللف الوسطي وقطر السلك على التوالي.

E = معامل المرونة.

n = عدد اللفات الفعالة.

النابض ذات الأسلاك مربعة المقطع

$$\sigma = \frac{6M}{h^3}$$

$$\sigma' = K_2 \sigma = K_2 \frac{6M}{h^3}$$

$$\varphi = \frac{6MnD}{Eh^4} \quad \text{دورة}$$

$$\varphi_1 = \frac{2160MnD}{Eh^4} \quad \text{درجة}$$

حيث

h = طول ضلع المقطع.

D = قطر اللف الوسطي.

K_2 = تابع النسبة $\frac{D}{h}$ ويؤخذ من المراجع الهندسية.

النوابض ذات الأسلاك مستطيلة المقطع

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2}$$

$$\sigma' = K_2 \sigma = K_2 \frac{6M}{bh^2}$$

$$\varphi = \frac{6MnD}{Ebh^3} \quad \text{دورة}$$

$$\varphi_1 = \frac{2160MnD}{Ebh^3} \quad \text{درجة}$$

حيث

h = العمق القطري للمقطع المستطيل.

D = قطر اللف الوسطي.

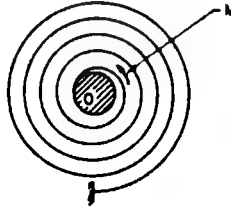
b = عرض المقطع المستطيل (بالاتجاه المحوري).

K_2 = تابع للنسبة $\frac{D}{h}$ ويؤخذ من المراجع الهندسية.

إذا تم تطبيق الحمل P على ذراع يبعد بمسافة R عن المحور، فإنه يمكن أخذ العزم M في المعادلة السابقة مساوياً للمقدار PR، ويعطى الانحراف في هذه الحالة بالاتجاه المحيطي عند نصف القطر R كما يلي $\phi_1.R/57.3$.

نوابض الاستطاعة اللولبية والنوابض ثابتة القوة (NEG'ATOR)

تملك النوابض الشعرية عادةً عدداً كبيراً من اللفات غير المتماسية، ونكون إحدى نهايتيه موثوقة. ويُنْتِج عدد اللفات n عن العزم المطبق M (الشكل 5.9).



الشكل 5.9 : نابض لولبي بعدد لفات كبير (موثوق النهاية الخارجية)

$$n = \frac{6Ml}{\pi E b h^3}$$

حيث

h = سماكة الشريط.

b = العرض.

l = طول الشريط الفعال.

E = عامل المرونة.

يعطى الانحراف الزاوي بالدرجات لكل 360n.

كما ويعطى الإجهاد الناتج عن عزم الانحناء σ بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2}$$

أو

$$\sigma = \frac{\pi nhE}{l}$$

قد توضع نوابض المحرك أو القدرة (الشكل 5.10) - مثل تلك المستخدمة في الساعات - ضمن حاوية مفرّغة.

إذا كان l يمثل الطول الفعال للشريط و h هو سماكته، عندها تكون مساحة المقطع الكلية لنابض اللفائف مساوية للمقدار πnh . وبالتالي:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi}lh + d_1^2}$$

حيث

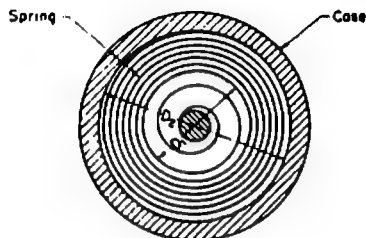
d_2 = القطر الخارجي للنابض ذو اللفائف.

d_1 = قطر المحور.

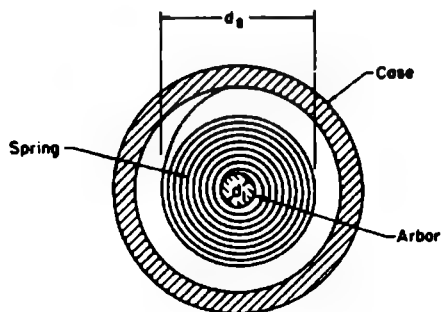
وبافتراض أن اللفائف قريبة من بعضها، فيمكن عندها حساب عدد اللفات للنابض ذو اللفائف بالعلاقة:

$$n = \frac{d_2 - d_1}{2h}$$

ويكون عدد اللفات الكلي ΔN المحررة من النابض في حالة عدم اللف (كما في الشكل 5.10) من النابض الملفوف (كما في الشكل 5.11) مساوياً للفرق بين n' و n ، وبالتالي:



الشكل 5.10 : نابض قدرة غير ملفوف موضوع ضمن حاوية



الشكل 5.11 : نابض قدرة ملفوف حول محور

$$\Delta N = n - n'$$

$$= \frac{\sqrt{(4/\pi)lh + d_1^2} + \sqrt{D_2^2 - (4/\pi)lh} - (D_2 + d_1)}{2h}$$

$$l = \frac{D_2^2 - d_1^2}{2.55h}$$

و

$$\Delta N = \frac{D_2^2 - d_1^2}{2hU} = \frac{4l}{\pi U}$$

حيث

$$U = \frac{D_2^2 - d_1^2}{\sqrt{2(D_2^2 + d_1^2) - (D_2 + d_1)}}$$

يتم الحصول على معادلات الإجهاد σ والعزم M وعدد اللفات الكلي ΔN عبر الافتراض بأن الشريط سيتعرض لعزم ثابت على كامل طوله:

$$M = \frac{\sigma b h^2}{6}$$

$$\sigma = \frac{6M}{b h^2} = \frac{\pi E h \Delta N}{l}$$

$$\Delta N = \frac{6Ml}{\pi E b h^3} = \frac{\sigma l}{\pi E h}$$

أيضاً

$$h = \sqrt[3]{\frac{1.5MU}{Eb}}$$

حيث

b = عرض الشريط.

h = السماكة.

E = عامل المرونة

النوابض ثابتة القوة (Neg'ator)

يعطى الحمل P لمثل هذا النابض بالعلاقة:

$$P = \frac{Eb h^3}{26.4} \left[\frac{1}{R_n^2} - \left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_l} \right)^2 \right]$$

حيث:

b = عرض وسماكة الشريط على التوالي.

E = عامل المرونة.

R_n = نصف قطر الانحناء الأصغري للفة.

R_1 = نصف قطر الوشعة الخارجي.

معادلات التصميم للنوابض المبسوطة ثابتة القوة (Neg'ator Extension) : يمكن استخدام المعادلات التصميمية التالية المقدمة من Votta لمثل هذه الأنواع كما في الشكل 5.12.



الشكل 5.12 : نابض ثابت القوة (نابض مبسوط ثابت القوة)

للنوابض التي لها عشر لفات أو أقل:

$$h \geq \frac{26.4P}{EbS_f^2}$$

$$R_n = \sqrt{\frac{Ebh^3}{26.4P}}$$

$$b = \frac{26.4P}{EhS_f^2}$$

$$R_2 = 1.15R_n$$

$$L = \delta + 10R_2$$

حيث

P = الحمل.

R_n = نصف القطر الأصغري لانحناء اللفة.

L = الطول الكلي للنابز.

R_2 = نصف قطر الجلبة الملفوف عليها النابز.

δ = الانحراف المطلوب (أو الامتداد المطلوب).

S_f = عامل يعتمد على عدد مرات التشغيل.

للتوابض التي لها أكثر من عشر لفات:

$$h \geq \frac{26.4P}{EbS_f^2}$$

$$R_m = \sqrt{\frac{Eb h^3}{26.4P}}$$

$$R_n = \frac{R_m}{1.15}$$

$$R_2 = 1.15R_m$$

$$L = \delta + 10R_2$$

حيث

$$R_m = \text{نصف القطر الأعظمي لانحناء اللفة.}$$

نوابض الأقراص المخروطية أو نوابض Belleville

يُفضل استخدام نوابض الأقراص المخروطية (والتي تعرف أيضاً بنوابض Belleville) في العديس من التصميم لما لها من ميزات. هذه النوابض تتألف بشكل رئيسي من أقراص دائرية مقعرة بشكل مخروطي، كما هو واضح في المقطع الميّن في الشكل 5.13.

عندما يتم تطبيق الحمولة على هذا النابض كما هو موضع فسيستسطح النابض نحو الخارج، ونتيجة لمرونته سيؤدي دور نابض. نفترض بأن الحمولة ستطبق على حوافه وتعطى كما يلي:

$$P = \frac{C_1 C E t^4}{R^2}$$

حيث

P = الحمل عند الانحراف δ عن الوضع غير المحمل.

C = عامل يعتمد على النسبة R/t .

R و r = نصفي القطر الخارجي والداخلي على الترتيب.

C_1 = عامل يعتمد على النسبتين δ/t و h/t يؤخذ من المراجع الهندسية.

h = ارتفاع المخروط الابتدائي المشكل للنابض.

t = السماكة.

ويعطى الإجهاد المرن عند الانحراف δ (إذا كان بإشارة سالبة فهذا يعني أنه إجهاد ضغط) كما يلي:

$$\sigma_c = -K_c \frac{E t^2}{R^2}$$

$$\sigma_{t1} = K_{t1} \frac{E t^2}{R^2}$$

$$\sigma_{t2} = K_{t2} \frac{E t^2}{R^2}$$

حيث

E = عامل المرونة.

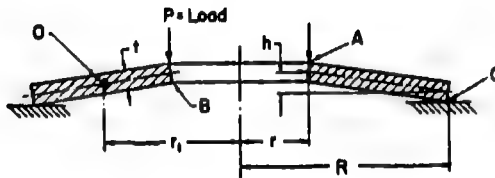
σ_c = الإجهاد عند الحافة الداخلية العلوية A.

σ_{t1} = الإجهاد عند الحافة الداخلية السفلى B.

σ_{t2} = الإجهاد عند الحافة الخارجية السفلى C.

تعتمد العوامل K_c و K_{t1} و K_{t2} على النسب $\frac{\delta}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{R}{r}$ على الترتيب.

ويمكن أن تؤخذ قيمة العامل K_c من أجل أي قيمة للنسبة $\frac{h}{t}$ و $\frac{\delta}{t}$ من مخططات موجودة في المراجع الهندسية.



الشكل 5.13 : نابض قرص مخروطي (نابض Belleville)

الإجهاد الاسمي σ_n . ويدعى هذا الإجهاد أيضاً بإجهاد الانحناء البسيط، ويستخدم من أجل الحملات الستاتيكية.

$$\sigma_n = \frac{0.96P}{t^2}$$

المعادلات الخاصة بانحراف وارتفاع المخروط الصغيرين

تعتمد هذه المعادلات على نظرية الصفيحة المستوية المرنة (elastic flat-plate theory)، وتفترض بأن قيمة النسبتين δ/t و h/t هي أقل من 0.5، كما تفترض أيضاً بأن الحمل يؤثر عند الحواف:

$$P = K_1 \frac{\delta Et^3}{R^2}$$

$$P = \frac{\sigma t^2}{K_3}$$

$$\sigma = K_2 \frac{\delta Et}{R^2}$$

$$\sigma = K_3 \frac{P}{t^2}$$

$$\delta = \frac{PR^2}{K_1 Et^3}$$

حيث

σ = الإجهاد عند الحافة الداخلية، وفي هذه الحالة تعتمد العوامل K_1 و K_2 و K_3 على النسبة R/t .

الحمل P' المطبق داخل الحواف

$$P' = P \frac{R-r}{a}$$

$$\delta' = \delta \frac{a}{R-r}$$

حيث

a = المسافة القطرية بين الحافتين.

P' = الحمل على الحافتين.

δ' = الانحراف بين الحافتين.

يحسب الحمل P من أجل انحراف δ معطى بين الحافتين الداخلية والخارجية.

وتحسب الإجهادات σ_c و σ_{t1} و σ_{t2} من النسبتين δ/h و h/t .

ويعطى الإجهاد الاسمي σ_n بالعلاقة:

$$\sigma_n = 0.96 \frac{P'}{t^2} \frac{a}{R-r}$$

النوابض المستوية والورقية

نابض الدعامة البارزة البسيط - عرض ثابت

الانحرافات الصغيرة: إن أبسط نوع من أنواع النوابض المستوية هو نابض الدعامة

البارزة البسيط، والحمل بحمل عند طرفه الحر (كما في الشكل 5.14). وتعطى قيمة

الانحراف في هذه الحالة بالمعادلة المعروفة التالية:

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}$$

حيث

l = طول النابض.

E = عامل المرونة.

I = عزيم عطالة مقطع النابض العرضي $(I = \frac{b_0 h^3}{12})$ ، حيث b_0 العرض و h السماكة).

وإذا أردنا نتيجة أدق في الحالات التي يكون فيها عرض الشريط أكبر بكثير بالمقارنة مع السماكة، أي b_0/h كبيرة حيث أن b_0 مقاربة للطول l ، يجب أن نأخذ عزيم العطالة كما في المعادلة

$$\frac{b_0 h^3}{12} (1 - \nu^2)$$

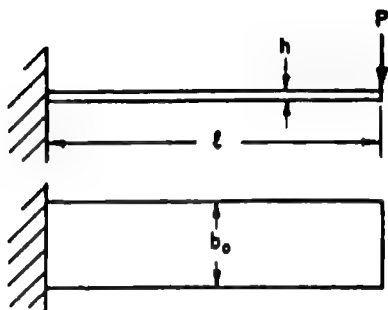
حيث ν : نسبة بواسون.

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} (1 - \nu^2)$$

وتكون قيمة ν من أجل معظم المعادن مساوية 0.3، مما يعني بأن النابض في مثل هذه الحالات سيكون أصلب بمقدار 10 % من القيمة المحسوبة، ومع ذلك تقع قيمة الانحراف في معظم الحالات العملية ضمن النتائج المحسوبة.

يعطى إجهاد الانحناء الاسمي σ عند حافة النابض المبين في الشكل 5.14 بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{6Pl}{b_0 h^2}$$



الشكل 5.14 : نابض الدعامة البارزة البسيط

نابض الدعامة البارزة البسيط ذو شكل شبه المنحرف

القوليات (الانحرافات) الصغيرة: تستخدم في حالات عديدة النوابض الورقية التي تأخذ صفائحها أشكالاً أشباه منحرفة (الشكل 5.15). يعطى التبدلي وفق نظرية الجوانز كما في العلاقة:

$$\delta = K_1 \frac{Pl^3}{3EI_o}$$

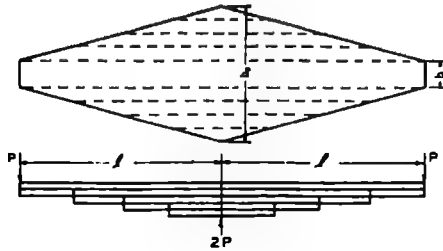
حيث

$$K_1 = \frac{3}{(1 - b/b_o)^3} \left[\frac{1}{2} - 2 \frac{b}{b_o} + \left(\frac{b}{b_o} \right)^2 \left(\frac{3}{2} - \ln \frac{b}{b_o} \right) \right]$$

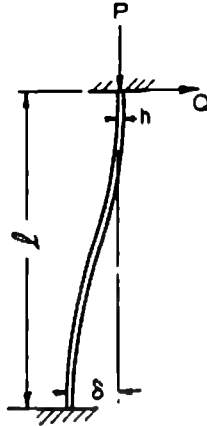
I_o = عزم العطالة عند النهاية الداخلية، بينما يعتمد العامل K_1 على النسبة $\frac{b}{b_o}$ ويمكن أخذه أيضاً من المراجع الهندسية.

النوابض المستوية المعرضة لحمولة مركبة محورية وجانبية

غالباً ما تحمل النوابض المستوية في الحياة العملية كما في الشكل 5.16، حيث تعتبر إحدى النهايتين موثوقة، بينما يسمح للأخرى بالحركة وفق الاتجاه الجانبي ولكنها تُمنع من الدوران. إذا كان الحمل المحوري P صغيراً بالمقارنة مع قوة الربط فإن الإزاحة والإجهاد يعطيان كما يلي:



الشكل 5.15 : نابض ورقي مكافئ لنابض دعامة بارزة ذو شكل شبه منحرف



الشكل 5.16 : نابض مستوي خاضع لحمل مركب محوري وجانبي

$$\delta = \frac{Ql^3}{12EI}$$

$$\sigma = \frac{38Eh}{l^2}$$

حيث

l = طول الجائز.

Q = الحمل الجانبي.

$I = bh^3/12$ = عزم عطالة المقطع.

b = العرض.

h = السماكة.

δ = الانحراف الكلي.

σ = الإجهاد الاسمي عند النهاية الموثوقة (مع إهمال تأثير حالة تركيز الإجهاد).

إذا كان الحمل المحوري P (كما في الشكل 5.16) ليس صغيراً بالمقارنة مع حمولات الانحناء فعندها لن تعطي المعادلتان السابقتان دقة مقبولة. وإن من الأدق في مثل هذه الحالات أن يضرب الإجهاد والانحراف المحسوبان بالعلاقتين السابقتين بعاملين C_1 و K_2 ، واللذين يعتمدان على النسبة $P/P_{cr} = Pl^2/EI\pi^2$ حيث يمثل P_{cr} حمل انحناء Euler للنهايات المتفصلة، ويعطى هذان العاملان بالعلاقتين:

$$C_1 = \frac{1}{1 - P/P_{cr}}$$

$$K_2 = 1 - 0.178 \frac{P}{P_{cr}}$$

ويصبح بالتالي الإجهاد والانحراف كما يلي:

$$\sigma = K_2 \frac{3\sigma E h}{l^2}$$

$$\delta = C_1 \frac{Q l^3}{12 E I}$$

يعبر الإجهاد σ عن المجال الناتج عن الانحراف الجانبي δ .

ويمكن إعطاء علاقة أكثر دقة للانحراف δ للنابض المبين في الشكل 5.16 كما يلي:

$$\delta = \frac{Q l}{P} \frac{(2 \tan kl) / 2 - kl}{kl}$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

حيث :

النوابض الورقية

تستخدم النوابض الورقية - والتي تكون أقل فاعلية من النوابض الحلزونية من حيث الطاقة المخزنة لكل باوند من المادة - بشكل واسع في مجال صناعة السيارات وذلك لأنها تلعب دوراً كعناصر إنشائية أيضاً.

يعتمد التصميم العملي للنوابض الورقية على افتراض أنهما جوائز ذات متانة منتظمة، ويكافئ هذا الفرض الفرض بأنها نوابض دعامة بارزة ذات مقطع مثلي. ويعطى الإجهاد الأعظمي σ والنسبة R تحت هذا الفرض للنابض الورقي شبه الاهليلجي المتناظر كما يلي:

$$R = \frac{P}{\delta} = \frac{8 E n b h^2}{3 l^3}$$

$$\sigma = \frac{3 P l}{2 n b h^2}$$

حيث

n = عدد الورقات.

b = العرض.

h = سماكة الورقة.

l = الطول.

P = الحمل.

وتصبح بالنسبة للتوابض الورقية شبه الاهليلجية غير المتناظرة (الشكل 5.17b) كما يلي:

$$R = \frac{P}{\delta} = \frac{Ebnh^3l}{6l_1^2l_2^2}$$

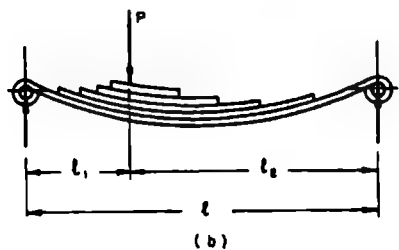
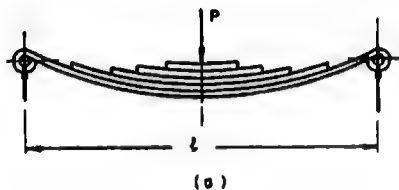
$$\sigma = \frac{6Pl_1l_2}{nbh^2l}$$

أما إذا كان النابض الورقي على شكل دعامات بارزة (الشكل 5.17c) يحوي n ورقة، l يمثل طول أطول ورقة عندها تصبح المعادلتان كما يلي:

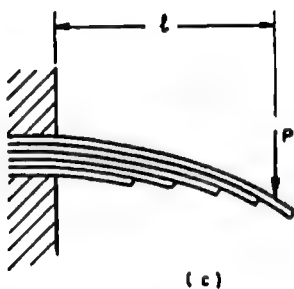
$$R = \frac{P}{\delta} = \frac{Ebnh^3}{6l^3}$$

$$\sigma = \frac{6Pl}{nbh^2}$$

SECTION FIVE



الشكل 5.17 : نوابض ورقية (a) على شكل شبه اهليلجي متناظر
(b) على شكل شبه اهليلجي غير متناظر



الشكل 5.17 : نوابض ورقية (c) على شكل دعامة بارزة /تابع/

الجدول 5.1

الحجوم القياسية للنوابض المستوية (النوابض الصفائحية المستخدمة في صناعة السيارات)												
120 and 150.	100.	90.	75.	70.	65.	60.	55.	50.	45.	40.	(mm)	العرض
			14 and 16.	12.	10.	8.	7.	6.	5.	4.	(mm)	المسافة

نوابض قضبان الفتل

عموميات

تتألف نوابض قضبان الفتل بشكل رئيسي من قضبان مستقيمة من معدن نابضي (الشكل 5.18) تتعرض بشكل رئيسي لعزم فتل. فتتخزن عندها فيه الطاقة بسبب فتل القضيب؛ كما في النوابض المستخدمة في تعليق المركبات السيارة وفي تطبيقات أخرى.

سنورد فيما يلي المعادلات التصميمية لنوابض قضبان الفتل متغيرة المقطع والمعرّضة لعزوم فتل صرفة. (وإذا تعرضت هذه النوابض لعزوم انحناء فعلينا أخذ الإجهادات الناتجة عن هذه العزوم بعين الاعتبار).

قضيب مصمت دائري المقطع

$$\phi = \frac{584 M_t l}{d^4 G}$$

$$\tau = \frac{16 M_t}{\pi d^3}$$

حيث

ϕ = الزاوية النهائية، deg.

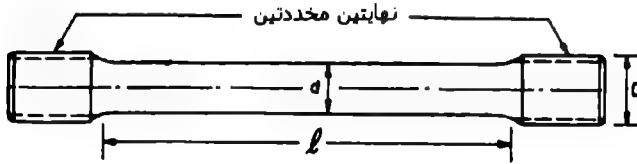
τ = إجهاد القص.

M_t = عزم الفتل المطبق.

d = قطر القضيب.

l = الطول الفعال للنابض.

G = عامل الجساءة.



الشكل 5.18 : نابض قضيب فتل بنهائيتين محددتين

قضيب مفرغ دائري المقطع

إذا كان القضيب مفرغاً ذا قطر خارجي d وقطر داخلي d_1 فتصبح عندها المعادلتان:

$$\phi = \frac{584 M_t l}{G(d^4 - d_1^4)}$$

$$\tau = \frac{16 M_t d}{G(d^4 - d_1^4)}$$

قضيب مربع المقطع

$$\phi = \frac{407 M_t l}{a^4 G}$$

$$\tau = \frac{4.81 M_t}{a^3}$$

حيث

a = طول ضلع المقطع المربع.

قضيبي مستطيل المقطع

$$\phi = \frac{57.3 M_1 l}{K'_1 a h^3 G}$$

$$\tau = \frac{M_1}{K'_2 a h^2}$$

حيث

a = الطول.

h = سماكة المقطع المستطيل الشكل، ويعتمد العاملان K'_1 و K'_2 على النسبة a/h .

نوابض الفتل المحملة بواسطة ذراع

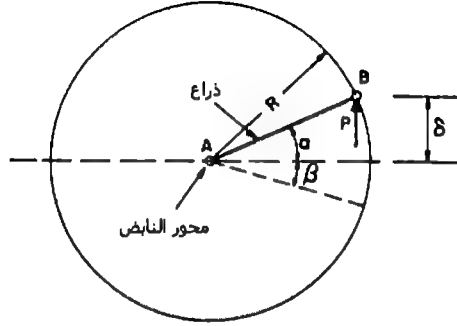
غالباً ما تحمل نوابض الفتل عبر ذراع AB (الشكل 5.19) موصول إلى إحدى نهايتيه، والتي تستند إلى مدحرج بينما تكون النهاية الأخرى موثوقة أو مثبتة. إذا ما تم قياس الانحراف δ بالنسبة للخط الأفقي بينما كانت الحمولة P شاقولية وكان القضيب دائري المقطع فيكون لدينا:

$$P = \frac{\pi d^4 G (\alpha + \beta)}{32 / R \cos \alpha}$$

تقاس α و β هنا بالراديان، حيث تمثل:

α الزاوية بين الذراع AB والخط الأفقي المرجعي.

β الزاوية بين الذراع والخط الأفقي المرجعي عندما تكون الحمولة معدومة.



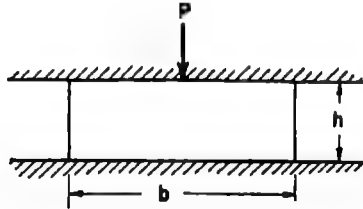
الشكل 5.19 : نابض قضيب قتل محمل بواسطة ذراع

تُعرَّف النسبة الشاقولية عند النهاية B للذراع (الشكل 5.19) بالعلاقة $dP/d\delta = k$

$$k = \frac{\pi d^4 G}{32 I R^2} \frac{1 + (\alpha + \beta) \tan \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

النوابض المطاطية ونوابض التثبيت

يمكن تقدير الانحراف δ لكتلة مضغوطة غير مسندة (الشكل 5.20) بشكل تقريبي من المعادلة التالية، مع الافتراض بأن السطح المضغوط مزيت جيداً وبالتالي سنسمح له بالتمدد الجانبي بحرية مع افتراض وجود انفعالات صغيرة.



الشكل 5.20 : كتلة مطاطية محملة بحمولة ضغط

$$\delta = \frac{Ph/AE}{1 + P/AE}$$

حيث

P = الحمل.

A = مساحة مقطع الشطيرة الأصلي.

h = السماكة الأصلية.

تعتمد هذه المعادلة على مبدأ ثبات حجم الكتلة المطاطية المضغوطة.

نوابض القص أو التي على شكل شطائر

تستخدم نوابض القص أو التي على شكل شطائر والمولفة من وسادتين مطاطيتين مثبتتين على صفيحتين فولاذيتين بشكل واسع في مجال عزل الاهتزازات أو تثبيت الآلات.

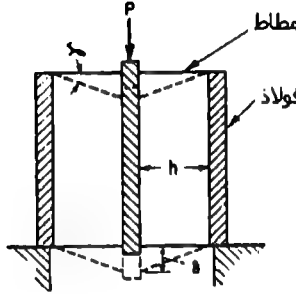
يُعطى إجهاد القص $\tau = \frac{P}{2A}$ حيث A = مساحة مقطع كل وسادة، كما وتساوي زاوية القص γ إلى τ/G حيث G معامل الجساءة.

ومن أجل الانحرافات الصغيرة $\gamma = \delta/h$ [rad]، حيث δ = الانحراف، h = سماكة الوسادة.

وبالتالي لدينا:

$$\delta = \frac{Ph}{2AG}$$

تعطى قيم المعامل G ومن أجل الانحرافات الصغيرة كتابع لقساوة مقياس التحمل في المراجع الهندسية.



الشكل 5.21 : نابض قص بسيط أو على شكل شطيرة

نوابض القص الاسطوانية

ارتفاع محوري ثابت

يتألف هذا النوع من نوابض القص بشكل رئيسي من وسادة اسطوانية مثبتة إلى حلقة فولاذية من الخارج وإلى محور أو حلقة من الداخل (الشكل 5.22). ويتم تطبيق حمولة P على طول المحور.

ويعطى إجهاد القص τ عند أي نصف قطر r كما يلي:

$$\tau = \frac{P}{2\pi r h}$$

إذا كانت y تعبر عن الانحراف عند نصف القطر r ، فبشكل تقريبي يمكن أن نكتب:

$$dy/dr = - \tau/G$$

وباستخدام الانحراف الكلي δ تصبح قيمة δ بشكل تقريبي مساوية إلى:

$$\delta \approx \frac{P}{2\pi h G} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

إجهاد ثابت

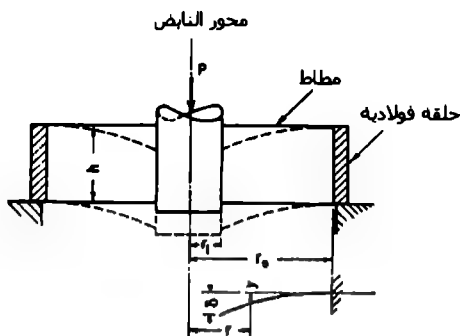
إذا كانت سماكة النابض المطاطي الاسطواني h متناسبة عكساً مع نصف القطر r ، عندها سيكون إجهاد القص ثابتاً وسنحصل على استثمار أفضل للمادة.

$$r = \frac{r_o h_o}{h}$$

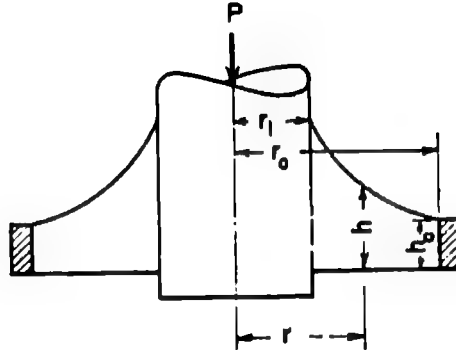
حيث

h_o = السماكة عند نصف القطر الخارجي r_o .

فإننا نحصل على المعادلة التالية:



الشكل 5.22: نابض قص اسطواني بارتفاع محوري ثابت وبحمولة محورية



الشكل 5.23: نابض اسطواناني بسماكة متغيرة واجهاد قص ثابت

$$\tau = \frac{P}{2\pi r_o h_o} = \text{const}$$

وسيكون الانحراف δ تقريباً مساوياً إلى $\frac{\tau}{G}$ مضروباً بالحد $(r_o - r_i)$ أي:

$$\delta \approx \frac{P(r_o - r_i)}{2\pi r_o h_o G}$$

نوابض الفتل الاسطوانية

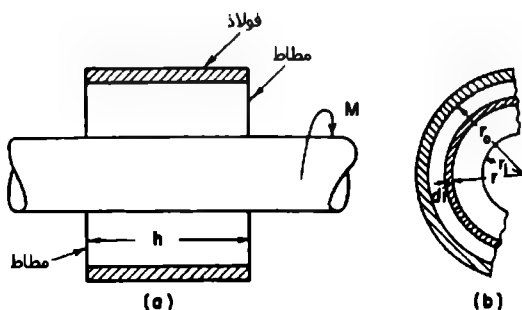
ثابتة السماكة

تؤخذ سماكة النابض h في هذه الحالة كقيمة ثابتة (الشكل 5.24)، بينما يؤثر عزم الفتل M على محور النابض. يعطى إجهاد القص τ عند نصف القطر r والنتاج عن العزم M كما يلي:

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h}$$

نحصل على إجهاد القص الأعظمي τ_m في هذه الحالة عندما $r = r_i$ والذي يساوي إلى:

$$\tau_m = \frac{M}{2\pi r_i^2 h}$$



الشكل 5.24 : نابض فتل اسطواناني مطاطي ثابت السماكة

ويُعطى الانحراف الزاوي بالعلاقة:

$$\theta = \frac{M}{4\pi h G} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right)$$

حيث تعطى الزاوية θ بالراديان.

وسنورد فيما يلي جدولاً بأصناف وقياسات الأسلاك المستخدمة في صناعة النوابض اللولبية:

الجدول 5.2 أصناف وحجوم الأسلاك

الصف	وصف السلك	قطر السلك (mm)	مجال الاستخدام
1	سلك مسحوب قاسي (بدون تلدين)	2.8 وما فوق	يستخدم للنوابض المعرضة لأحمال ستاتيكية أو بطيئة التغير، ويستخدم للإجهادات المنخفضة.
2	سلك مسحوب قاسي (مع تلدين)	0.25 حتى 10.0	يستخدم للنوابض المعرضة لأحمال دورية متوسطة، ولإجهادات متوسطة.
3	سلك عالي التشغيل (غير مبلّخ)	0.25 حتى 10.0	يستخدم للنوابض المعرضة لحمولات ستاتيكية عالية تحت الإجهادات الديناميكية المتوسطة حتى العالية، ويستخدم للأقطار الأصغر حتى لو تعرض النابض لحمولات صدم.
4	سلك عالي التشغيل (مبلّخ)	0.25 حتى 10.0	مناسب للنوابض المعرضة لإجهادات ستاتيكية عالية جداً، والنوابض المعرضة لإجهادات ديناميكية متوسطة.

وسنورد الآن جدولاً يحوي الأقطار القياسية للأسلاك.

الجدول 5.3 الأقطار القياسية للأسلاك (mm)

أسلاك فولاذية مسحوبة على البارد غير خلاطية	أسلاك فولاذية لنوابض مقساة ومراجعة وأسلاك نوابض الصمامات	سلك فولاذي غير قابل للصدأ يستخدم لمقاومة التآكل العادية
0.07 to 0.12 - 0.01	1.00 to 1.10 - 0.05	0.10, 0.11, 0.125
0.14 to 0.22 - 0.02	1.2, 1.25	0.14 to 0.22 - 0.02
0.25	1.30 to 2.10 - 0.10	0.25
0.28 to 0.40 - 0.02	2.25	0.28 to 0.40 - 0.02
0.43, 0.45, 0.48	2.40 to 2.60 - 0.10	0.43, 0.45, 0.48, 0.50
0.50, 0.53, 0.56	2.80 to 4.00 - 0.20	0.53, 0.56, 0.60, 0.63
0.60, 0.63	4.25 to 5.00 - 0.25	0.65 to 1.30 - 0.05
0.65 to 1.30 - 0.05	5.30, 5.60, 6.00, 6.30	1.40 to 2.10 - 0.10
1.40 to 2.10 - 0.10	6.50 to 11.00 - 0.50	2.25, 2.40, 2.50, 2.60
2.25, 2.40, 2.50	12.0, 12.5, 13.0,	2.80, 3.00, 3.15
2.60, 2.80, 3.00	14.0	3.20 to 4.00 - 0.20
3.20 to 4.00 - 0.20		4.25 to 5.00 - 0.25
4.25 to 5.00 - 0.25		5.30, 5.60, 6.00, 6.30
5.30, 5.60, 6.00, 6.30		6.50 to 10.00 - 0.50
6.50 to 11.0 - 0.50		
12.0, 12.50		
13.00 to 17.00 - 1.00		

ويسين الجدول التالي المقاطع القياسية للنوابض المستوية (النوابض الصفائحية ذات الصفائح المدرفلة)

الجدول 5.4 كل الأقطار معطاة بالمليمتر

العرض	السماكة	العرض	السماكة	العرض	السماكة
50	10	90	6	115	10
50	13	90	8	115	11
63	6	90	10	115	13
63	8	90	11	115	16
63	10	90	13	115	19
63	11	90	16	120	16
63	13	90	19	120	19
75	6	100	8	125	10
75	8	100	10	125	13
75	10	100	11	125	16
75	11	100	13	140	11
75	13	100	16	140	13
75	16	100	19	150	11
				150	13
				150	16

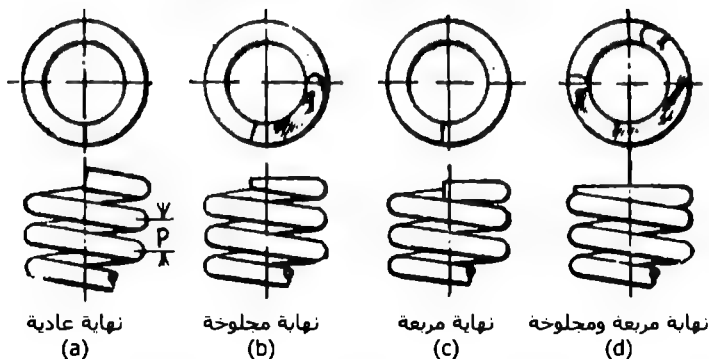
أما الجدول التالي فيعطي إجهادات تصميم النوابض.

الجدول 5.5 MN/m^2 (kgf/mm^2) إجهادات التصميم للنوابض

قطر السلك (mm)	حمولات تشغيل قليلة	حمولات تشغيل متوسطة	حمولات تشغيل عالية
Upto 2.10	414 (42.2)	517 (52.7)	640 (65.4)
2.10 - 4.50	380 (38.7)	476 (48.5)	586 (59.8)
4.50 - 8.00	330 (33.8)	414 (42.2)	510 (52.0)
8.00 - 13.00	290 (29.5)	360 (36.6)	448 (45.7)
13.00 - 25.00	248 (25.3)	310 (31.6)	386 (39.4)
25.00 - 38.00	220 (22.5)	276 (28.1)	345 (35.2)

وسنورد الآن كيفية حساب عدد اللفات الفعالة كتابعة لنوع نهاية النابض.

الأنواع المختلفة لنهايات وشيعة النابض



الشكل	العدد الحقيقي للفتات	الطول المفرد	الطول الحر
(a)	i	$(i + 1)d$	$ip + d$
(b)	i	(id)	ip
(c)	$i + 2$	$(i + 3)d$	$ip + 3d$
(d)	$i + 2$	$(i + 2)d$	$ip + 2d$

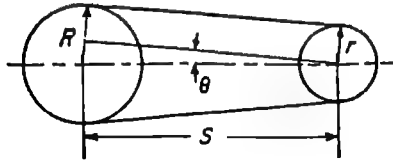
حيث i تمثل العدد الفعال للفتات.

السيور المسطحة (الأقشطة)

طول السير

يعطى الطول الكلي للسير (الشكل 5.25) بالعلاقة:

$$L = 2S \cos \theta + \pi [R + r + (R - r) \theta/90] \text{ in}$$



الشكل 5.25 : شكل نموذجي للقيادة عبر السير

حيث

S = المسافة بين مركزي البكرتين.

R = نصف قطر البكرة الكبيرة (السيور المسطحة) أو القطر الخطوي للبكرة الكبيرة (السيور على شكل V).

r = نصف قطر البكرة الصغيرة (السيور المسطحة) أو القطر الخطوي للبكرة الصغيرة (السيور على شكل V).

$$\theta = \sin^{-1} [(R - r)/S], \text{ deg}$$

تعبّر نسبة السرعة عن النسبة بين السرعة الزاوية للمحور القائد إلى السرعة الزاوية للمحور المقاد، وبالتالي:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$N_1 D_1 = N_2 D_2$$

حيث

N_1 = سرعة دوران المحور القائد، rpm.

N_2 = سرعة دوران المحور المقاد، rpm.

D_1 = قطر البكرة القائدة.

D_2 = قطر البكرة المقادة.

تعمل سحابة السير المسطح في حالة السيور المسطحة، كما ويعتبر القطر الخارجي للبكرة هو قطر البكرة.

عندما نستخدم القيادة عبر سلسلة علينا تطبيق العلاقة:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

حيث

n_1 = عدد أسنان الدولاب المسنن القائد.

n_2 = عدد أسنان الدولاب المسنن المقاد.

سرعة السير

يمكن إيجاد السرعة التي يتحرك بها السير عبر تطبيق العلاقة:

$$V = \frac{\pi DN}{12} = 0.262DN$$

حيث

V = السرعة، ft/min (m/min).

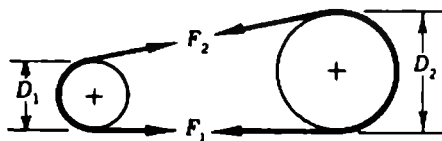
D = قطر البكرة، in (cm).

N = سرعة الدوران، rpm.

قوة الشد المؤثرة على السير

يمكن إيجاد العزم المؤثر على البكرة الصغرى اعتماداً على الشكل 5.26 - حيث تمثل F_1 قوة الشد على الجانب المشدود و F_2 قوة الشد على الجانب المرنخي (غير المشدود) من البكرة - بالعلاقة:

$$T_1 = (F_1 - F_2) \frac{D_1}{2}$$



الشكل 5.26 القوى المؤثرة على السير

كما ويعطى العزم عند البكرة الكبرى كما يلي:

$$T_2 = (F_1 - F_2) \frac{D_2}{2}$$

يعرف الحد $F_1 - F_2$ بالشد الصافي.

الاستطاعة المنقولة

تعطى معادلة الاستطاعة المنقولة بواسطة السير بالحصان وفق العلاقة التالية:

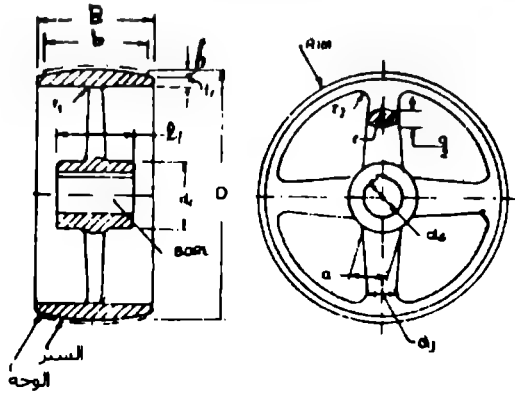
$$hp = F_e \frac{0.262DNW}{33,000} = \frac{F_e DNW}{126,000}$$

حيث

F_e = الشد الصافي على عرض السير ، lb/in (Kg/cm).

W = عرض السير ، in (cm).

تصميم البكرات المصنوعة من حديد الصب



الشكل 5.27 بكرة حديد صب

بحسب قطر البكرة الصغرى وفق علاقة Saverin التجريبية كما يلي:

$$d = D_{\min} = (525 - 630) \sqrt[3]{\frac{P(KW)}{2\pi n_{\max}}}$$

حيث

n_{\max} = سرعة الدوران الأعظمية، rev/sec.

تعتبر هذه العلاقة صحيحة في حالة النقل مع تخفيض سرعة الدوران (أي البكرة القائدة هي الصغيرة). أما إذا كان النقل مع زيادة سرعة الدوران فيجب عندها معرفة سرعة السير V ومن ثم يتم تحديد القطر d .
ويعطى قطر البكرة المقادة بالعلاقة:

$$D = (1 - \epsilon) di$$

حيث

ϵ معامل الزحف وقيمته من 0.01 وحتى 0.03.

i نسبة السرعة.

ويعطى عرض وجه البكرة (معادلة Barth) كما يلي:

$$B = 1\frac{3}{16}b + 10.0 \text{ mm} \quad (\text{للسير ذات زمن التشغيل العالي})$$

$$B = 1\frac{3}{32}b + 5.0 \text{ mm} \quad (\text{للسير التي تعمل لأوقات قصيرة})$$

b : عرض السير أو القشاط.

ويعطى عدد أذرع البكرة تبعاً لقطرها كما يلي:

❖ من أجل $D < 200 \text{ mm}$ نستخدم الأوتار

❖ من أجل $D = 200 \text{ mm}$ وحتى $D = 450 \text{ mm}$ نأخذ عدد الأذرع $i = 4$.

❖ $D > 450 \text{ mm}$ نأخذ عدد الأذرع $i = 6$.

وتكون مساحة مقطع الذراع الأهلبيجي بالقرب من المحور:

$$a = 2.94\sqrt[3]{BD/4i} \quad \text{لسير مفرد}$$

$$a = 2.94\sqrt[3]{BD/2i} \quad \text{لسير مضاعف}$$

بينما تكون مساحة مقطع الذراع بالقرب من الإطار (a1) متناقصة 4 mm لكل 100 mm.

ويكون نصف قطر التقوس بين الذراع والإطار بالقيمة:

$$r = \frac{3}{4}a$$

ويعطى تقريباً مقدار تقوس سطح البكرة بالعلاقة:

$$h = 0.003 D$$

وتعطي العلاقة بين قطر المحور المدير للبكرة وبين قطر البطيخة (hub) كما يلي:

$$\frac{d_1 - d_s}{2} = 0.412\sqrt[3]{B \cdot D} + 6 \text{ mm}$$

$$\text{للسير المضاعف} \quad - 0.529\sqrt[3]{B \cdot D} + 6 \text{ mm}$$

حيث

B = عرض السير، mm.

D = قطر البكرة، mm.

d₁ = قطر البطيخة، mm.

d_s = قطر المحور، mm.

ويكون طول البطيخة

$$l_1 \geq \frac{2}{3}B$$

$$\leq B$$

$$\geq 1.5d_s$$

وتكون سماكة الإطار الخارجي للبكرة محددة بالعلاقة:

$$t_r = \frac{D}{200} + 3 \text{ mm}$$

$$t_r = \frac{D}{200} + 6 \text{ mm}$$

وسنورد فيما يلي الأقطار النظامية للبكرات المصنوعة من الحديد الصب والبكرات المصنوعة من الفولاذ المتوسط الكربون معطاة بالمليمتر:

الجدول 5.6

40,	45,	50,	56,	63,	71,	80,	90,	100,	112,	125,	140,	160,	180,	200.
224,	250,	280,	315,	355,	400,	450,	500,	560,	630,	710,	800,	900,	1000,	1120,
1250,	1400,	1600,	1800,	2000										

كما ويعطى عرض سطح البكرات النظامية المصنوعة من الحديد الصب والفولاذ المتوسط الكربون بالجدول التالي معطى بالمليمتر:

الجدول 5.7

20,	25,	32,	40,	50,	53,	71,	80,	90,	100,	112,	125,	140,	160,	180,
200,	224,	250,	280,	315,	355,	400,	450,	500,	560,	630,				

السيور التي على شكل حرف V

تصنف هذه السيور وفق خمسة أصناف مبينة في الجدول التالي:

الجدول 5.8

رمز السير V	A	B	C	D	E
العرض الاسمي للوحة العلوي للسر (mm)	13	17	22	32	38
السماكة الاسمية (mm)	8	11	14	19	23
السرعة العظمى المفضلة (m/s)	25	25	25	30	30
المجال المفضل للاستطاعة المتنوعة (KW)(Mhp)	0.4 - 4.0 (0.5 - 50)	1.5 - 15 (2 - 20)	10 - 70 (15 - 100)	35 - 150 (50 - 200)	70 - 260 (100 - 350)
عدد الأسلاك الأعظمى	6	9	12	14	20

وتعطي العلاقة بين قوى الشد المطبقة على السير V وعند سرعات عالية بالعلاقة:

$$\frac{T_1 - T_c}{T_2 - T_c} = e^{\mu_1 \theta}$$

حيث

T_1 = قوة الشد عند الجانب المشدود، N (Kgf).

T_2 = قوة الشد عند الجانب غير المشدود، N (Kgf).

T_c = القوة المركزية المؤثرة على السير.

θ = قوس التماس بين السير والبكرة، rad.

$\mu_1 = \mu / \sin(\alpha/2)$ معامل الاحتكاك الظاهري.

α = زاوية التجويف داخل البكرة الذي على شكل v .

μ = معامل الاحتكاك بين السير ومعدن البكرة ويعطى وفق معادلة Barth

كما يلي:

$$\mu = 0.54 - \frac{0.712}{2.542 + v}$$

v : سرعة السير m/sec، هذا إذا كان السير جلدي والبكرة فولاذية أما إذا كان غير ذلك فيعطى معامل الاحتكاك وفق الجدول التالي:

الجدول 5.9 معامل الاحتكاك بين السيور ومواد البكرات

مادة البكرة

مادة السير	حديد فولاذ	خشب	ورق	حديد رطب	حديد مشتم	حديد مزيت
جلد مدبوغ بالسنديان	0.25	0.30	0.35	0.20	0.15	0.12
جلد مدبوغ معدنيًا	0.40	0.45	0.50	0.35	0.25	0.20
كتان أو قنب مفرز	0.20	0.23	0.25	0.15	0.12	0.10
Balata	0.32	0.35	0.40	0.20	-	-
قطن منسوج	0.22	0.25	0.28	0.15	0.12	0.10
شعر حمل	0.35	0.40	0.45	0.25	0.20	0.15
مطاط مخشن	0.30	0.32	0.35	0.18	-	-

مادة السير	حديد فولاذ	خشب	ورق	حديد رطب	حديد مشتم	حديد مزيت
مطاط مغطى	0.32	0.35	0.38	0.15	-	-
مطاط مع نسيج	0.35	0.38	0.40	0.20	-	-

وتعطى معادلات الاستطاعة المنقولة لكل صنف من أصناف السيور V بالجدول التالي:

الجدول 5.10

رمز مقطع السير	المعادلة	القيمة العظمى للقطر de في المعادلة mm
A	$kW = (0.61v^{0.00} - \frac{26.68}{d_g} - 1.04 \times 10^{-4}v^2) \times 0.7355v$	125
B	$kW = (1.08v^{0.00} - \frac{69.68}{d_g} - 1.78 \times 10^{-4}v^2) \times 0.7355v$	175
C	$kW = (2.01v^{0.00} - \frac{194.8}{d_g} - 3.18 \times 10^{-4}v^2) \times 0.7355v$	300
D	$kW = (4.29v^{0.00} - \frac{690}{d_g} - 6.48 \times 10^{-4}v^2) \times 0.7355v$	425
E	$kW = (6.22v^{0.00} - \frac{1294}{d_g} - 9.59 \times 10^{-4}v^2) \times 0.7355v$	700

حيث KW = الاستطاعة المنقولة العظمى بالكيلو واط وعند قوس تماس بمقدار 180° لسير بطول وسطي.

v = سرعة السير، m/s.

$d_e = d.k_d$ = القطر الخطوي المكافئ، mm.

d = القطر الخطوي للبكرة الصغرى، mm.

K_d = عامل صغر القطر يؤخذ من الجدول التالي:

الجدول 5.11 عامل صغر القطر K_d

K_d	مجال نسبة السرعة	K_d	مجال نسبة السرعة	K_d	مجال نسبة السرعة
1.10	1.341 to 1.429	1.05	1.110 to 1.142	1.00	1.000 to 1.019
1.11	1.430 to 1.562	1.06	1.143 to 1.178	1.01	1.020 to 1.032
1.12	1.563 to 1.814	1.07	1.179 to 1.222	1.02	1.033 to 1.055
1.13	1.815 to 2.948	1.08	1.223 to 1.274	1.03	1.056 to 1.081
1.14	2.949 and over	1.09	1.275 to 1.340	1.04	1.082 to 1.109

عدد السيور المطلوبة:

$$n' = \frac{PK_s}{(KW)K_L K_d} \text{ عدد السيور}$$

حيث

P = الاستطاعة المنقولة.

K_s = عامل تصحيح يعتمد على ظروف التشغيل يؤخذ من المراجع الهندسية.

K_L = عامل تصحيح يعتمد على طول السير يؤخذ من المراجع الهندسية.

K_d = عامل تصحيح يتعلق بزاوية التماس بين السير والبكرة ويؤخذ من المراجع الهندسية.

K_w = الاستطاعة التي يستطيع السير نقلها ويؤخذ من المراجع الهندسية كتاب تصنيف السير والقطر الخطوي المكافئ.

تعطى المسافة بين مركزي البكرتين بالعلاقة:

$$C = A + \sqrt{A^2 - B}$$

حيث

$$A = \frac{L}{4} - \frac{\pi(D+d)}{8}$$

$$B = \left[\frac{D-d}{8} \right]^2$$

d = القطر الخطوي للبكرة الصغرى.

D = القطر الخطوي للبكرة الكبرى.

كما ويعطى طول السير الخطوي بالعلاقة:

$$L = 2C + 1.57(D+d) + \frac{(D-d)^2}{4C}$$

السلاسل الاسطوانية الدوارة

تعطى السرعة الوسطى للسلسلة بالعلاقة:

$$V = \frac{pNn}{12}$$

حيث

V = السرعة المتوسطة ft/min.

P = خطوة السلسلة، in (cm).

N = عدد دورات البكرة المسننة بالدقيقة، rpm.

n = عدد أسنان البكرة المسننة.

كما ويمكن إيجاد الطول التقريبي للسلسلة عبر تطبيق العلاقة:

$$L = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{2C}{p} + \frac{p(n_1 + n_2)^2}{39.5C}$$

حيث

L = طول السلسلة مقدرة بالوصلات.

n_1, n_2 = عدد أسنان الدولابين المسننين.

C = المسافة المركزية، in (cm).

P = خطوة السلسلة، in (cm).

وتعطى الاستطاعة المنقولة بالسلسلة مقدرة بالحصان وفق العلاقة:

$$hp = \frac{F_a V}{33,000}$$

حيث

F_a = قوة الشد المسموح بها في السلسلة lb (Kg).

V = سرعة السلسلة، ft/min (m/min).

بإهمال القوة الطاردة المركزية والتي يمكن إهمالها عند العمل بالسرعات المعقولة، نرى بأن المعادلة الأشهر التي تحدد قوة الشد المسموح بها في السلاسل تعطى بالعلاقة:

$$F_a = \frac{2,600,000A}{V + 600}$$

حيث

A = مساحة مقطع وتد الوصل، (cm²).

تعطى جميع أبعاد السلسلة القياسية كتوابع لخطوطها، كما تعطى مساحة وتد الوصل بالعلاقة:

$$A = 0.273p^2$$

وتعطى القيم القياسية لخطوات السلاسل كما يلي:

$$\frac{1}{4}, \frac{3}{8}, \frac{1}{2}, \frac{5}{8}, \frac{3}{4}, 1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 1\frac{3}{4}, 2, 2\frac{1}{2} \text{ in}$$

السلاسل الصامتة (سلاسل ذات حلقات مفلطحة متناوبة مع مسامير الربط)

تعطى الاستطاعة المنقولة بالحصان البخاري وفق العلاقة:

$$hp = \frac{T_p VW}{33,000}$$

حيث

T_p = الشد المسموح به، lb/in.

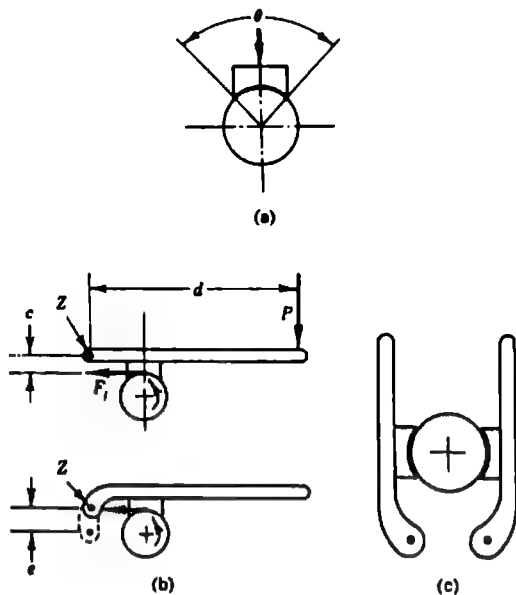
v = السرعة، (m/min)

W = عرض السلسلة، in (cm).

يجب أن تكون قدرة السلسلة الكلية أكبر من القدرة الاسمية الواجب نقلها، وتختلف الكمية الإضافية بحسب التطبيق. فإذا كان هناك صدم بسيط فيجب أن تكون قدرة السلسلة أكبر بمرتين من القدرة الاسمية.

المكابح ذات اللقم

تتألف المكابح ذات اللقم بأبسط أشكالها من كتلة خشنة (لقمة) تضغط على المحور كما هو مبين في الشكل 5.28 وتعرف القوة المنتقلة إلى اللقمة بالاحتكاك بقوة الاحتكاك وتعطى كما يلي:



الشكل 5.28 (a) كابح لقم بسيط
(b) مخطط القوى لكابح لقم
(c) كابح بلقمتين

$$F_f = f F_n$$

حيث

$$F_f = \text{قوة الاحتكاك، lb (N).}$$

$$f = \text{عامل الاحتكاك.}$$

$$F_n = \text{الحمل المطبق من اللقمة على الاسطوانة أو المحور الدوار، lb (N).}$$

ويمكن اعتبار هذه القوة كمقاومة تبديها اللقمة لتأثير دوران الاسطوانة، ويعطى العزم المقاوم بالعلاقة:

$$T = F_f r$$

أو

$$T = f F_n r$$

حيث

$$T = \text{العزم المقاوم، lb.in (N.m).}$$

$$r = \text{نصف قطر الاسطوانة أو المحور، in (mm).}$$

يمكن استخدام المعادلة السابقة للقم الطويلة ذات زاوية التماس (الزاوية θ في الشكل 5.28a) أقل من 60° . أما إذا كانت زاوية التماس أكبر من ذلك فإن الضغط سيتم بتوزيع غير منتظم. وننصحك باستخدام العلاقة:

$$T = \frac{4 f F_n r \sin(\theta/2)}{\theta + \sin \theta}$$

حيث

$$\theta = \text{زاوية التماس، rad.}$$

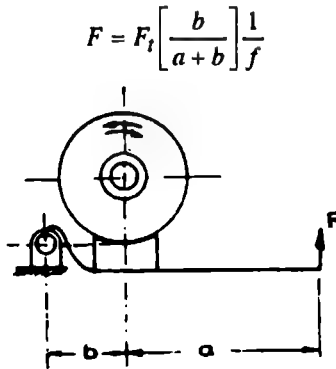
وسنورد فيما يلي ثلاث حالات لتوضع الكابح ذو اللقم حيث:

F = القوة في نهاية ذراع الكابح، $N (Kgf)$.

F_t = القوة المماسية عند إطار حلقة دولاب الكابح، $N (Kgf)$.

f = عامل الاحتكاك بين اللقمة ودولاب الكابح.

للدوران في كلا الاتجاهين:



$$F = F_t \left[\frac{b}{a+b} \right] \frac{1}{f}$$

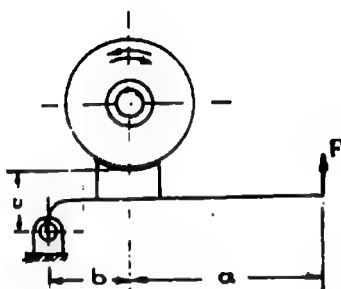
الشكل 5.29

دوران مع عقارب الساعة الشكل 5.30:

$$F = \frac{F_t b}{a+b} \left(\frac{1}{f} - \frac{c}{b} \right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{F_t b}{a+b} \left(\frac{1}{f} + \frac{c}{b} \right)$$



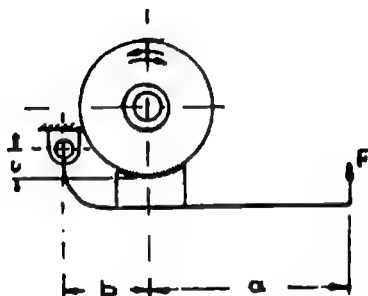
الشكل 5.30

دوران مع عقارب الساعة وفق الشكل 5.31:

$$F = \frac{F_t b}{a + b} \left(\frac{1}{f} + \frac{c}{b} \right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{F_t b}{a + b} \left(\frac{1}{f} - \frac{c}{b} \right)$$



الشكل 5.31

الكوابح ذات السيور

يتألف الكابح ذو السير من سير فولاذي مبطن بمادة احتكاكية كما في الشكل 5.32. وتعتبر القوة المطبقة قادرة على تثبيت السير حول الاسطوانة الدوارة، ويمثل الفرق بين القوتين F_1 و F_2 قوة الاحتكاك، وبنفس الأسلوب يمثل ذلك الفرق القوة المطبقة من السير. يعطى عزم الكبح بالعلاقة التالية:

$$T = r (F_1 - F_2)$$

حيث

r = نصف قطر الاسطوانة المكبوحة، in (mm). كما ويمكن إيجاد قوى الشد من العلاقة:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\theta f}$$

و

$$F_1 = r b p_s$$

حيث

e = ثابت رياضي بقيمة 2.718.

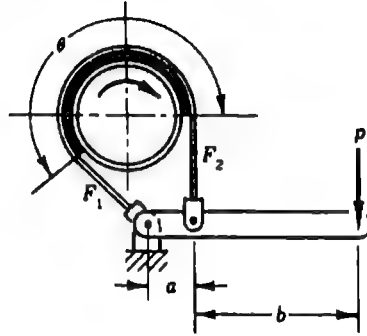
θ = زاوية التماس، rad.

b = عرض السير، in (mm).

P_s = الضغط الأعظمي المسموح به، psi (MPa).

وتحسب القوة المطلوبة لتحقيق الكبح بالعلاقة:

$$P = F_2 \frac{a}{a + b}$$



الشكل 5.32 : كابح ذو سير

وسنورد الآن العلاقات والأشكال المعيرة عن الكوابح ذات السيور البسيطة والتفاضلية:

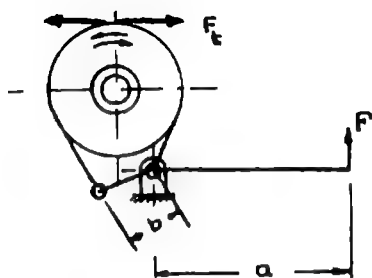
(a) كابح بسيط ذو سير:

دوران مع عقارب الساعة وفق الشكل 5.33:

$$F = \frac{bF_1}{a} = \frac{F_1 b}{a} \left(\frac{e^{\theta}}{e^{\theta} - 1} \right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_2}{a} = \frac{F_2 b}{a} \left(\frac{1}{e^{\theta} - 1} \right)$$



الشكل 5.33

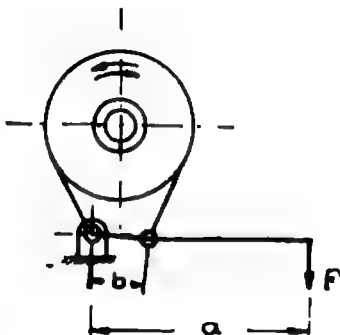
(b) كابح بسيط ذو سير انظر الشكل 5.34:

دوران مع عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_2}{a} = \frac{F_t b}{a} \left(\frac{1}{e^{\theta} - 1} \right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_1}{a} = \frac{F_t b}{a} \left(\frac{e^{\theta}}{e^{\theta} - 1} \right)$$



الشكل 5.34

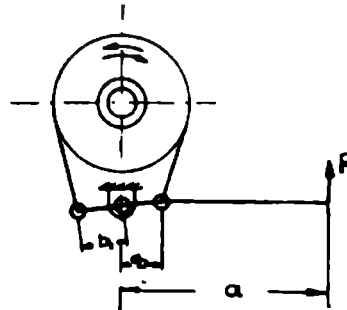
(c) كابع تفاضلي:

دوران مع عقارب الساعة:

$$F = \frac{b_2 F_1 - b_1 F_2}{a} = \frac{F_1}{a} \left(\frac{b_2 e^{f\theta} - b_1}{e^{f\theta} - 1} \right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{b_2 F_2 - b_1 F_1}{a} = \frac{F_1}{a} \left(\frac{b_2 - b_1 e^{f\theta}}{e^{f\theta} - 1} \right)$$



الشكل 5.35 كابع تفاضلي

وسنورد في نهاية هذه الفقرة جدولاً يبين قيم الحد $e^{f\theta}$ لأنواع مختلفة من السيور والبكرات.

الفواصل الواصل

الفواصل الواصل القرص

يبين الشكل 5.36 فاصلاً واصلًا قرصياً. يثبت الجزء A مع محور، بينما يربط الجزء B مع محوره عبر خابور، ويثبت الوجه C على الجزء B. وعندما يُدفع الجزء B لسيواجه الجزء A يحقق الوصل، وإذا أبعد عن الجزء A فسيحدث عندها الفصل، وبفرض D و d قطري الوجهين، وبسبب عدم فاعلية تطابق وجه مع محور دوار فنادرًا ما يكون d أقل من $\frac{1}{2}D$.

يعتمد تصميم الفاصل الواصل على فرضية أن الضغط سيكون موزعاً بشكل منتظم وسيكون التآكل منتظماً ولكنها ليست الحالة الحقيقية. وتعطى العلاقة الأنجح في هذه الحالة بالشكل:

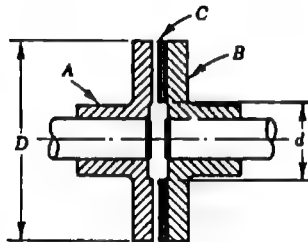
$$T = \frac{fP(D + d)}{4}$$

حيث

T = العزم المنقول، lb.in (N.m).

P = الحمل المحوري، lb (N).

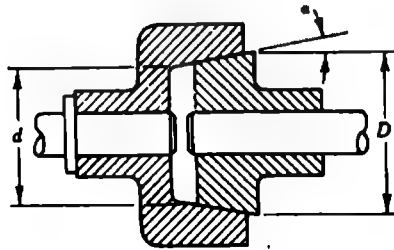
f = عامل الاحتكاك.



الشكل 5.36 : فاصل واصل قرصي

الفاصل الواصل المخروطي

يعتبر الفاصل الواصل المخروطي والمبين في الشكل 5.36 فاصلاً واصلاً احتكاكياً بسيطاً يملك ميزة هامة وهي أن أي قوة محورية بسيطة ستنتج قوة ضغط كبيرة على سطح الاحتكاك. يجب أن لا تقل الزاوية α عن 8° كما أنها عادةً لا تتجاوز 15° ، ويمكن إيجاد العزم المنقول من المعادلة السابقة مع إدخال تأثير الزاوية كما يلي:



الشكل 5.37 : فاصل واصل مخروطي

$$T = \frac{fP(D+d)}{4 \sin \alpha}$$

حيث

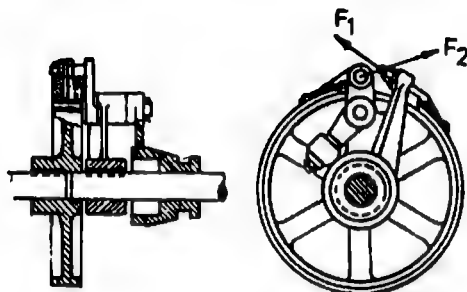
f = معامل الاحتكاك، بينما بقية الرموز موضحة على الشكل 5.37.

الفاصل الواصل ذو السير

تعطى النسبة بين قوتي الشد على طرفي السير (القشاطر):

$$F_1/F_2 = e^{\mu}$$

وتؤخذ قيمة الحد e^{μ} من الجدول الوارد في نهاية هذه الفقرة.



الشكل 5.38 الفاصل الواصل ذو السير

ويعطى العزم المنقول بالعلاقة:

$$T = (F_1 - F_2) r$$

حيث

F_1 = قوة الشد العظمى في السير، N (Kgf).

F_2 = قوة الشد على الطرف الثاني من السير، N (Kgf).

r = نصف قطر اسطوانة الاحتكاك، (mm).

θ = قوس التماس، rad.

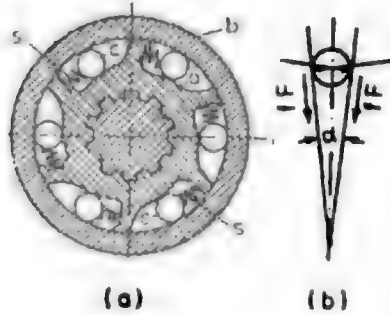
كما ويعطى الضغط الاسمي الأعظمي بالعلاقة:

$$P_{\max} = \frac{F_1}{br}$$

حيث

b = عرض السير، mm.

الفاصل الواصل ذو المدرجات الاسطوانية



الشكل 5.39 الفاصل الواصل ذو المدرجات الاسطوانية

قوة حشر المدرجة

$$F = Ft / \tan \alpha$$

العزم المنقول

$$T = \frac{1}{2} F_t . D$$

حيث

F_t = القوة المحاسبية الضرورية لنقل العزم عند القطر الخطوي D .

α = الزاوية بين مماسي منحنى الكامة والغطاء عند نقاط التماس مع المدرجة.

$$\alpha < 2 \phi$$

حيث

$$\tan \phi = f = 0.03 \rightarrow 0.05$$

تتراوح القيمتان السابقتان بين السطوح الفولاذية الخشنة والمصقولة.

ويعطى الحمل المسموح به من أجل i' مدرجة بالعلاقة:

$$F \leq i' \sigma_b k l d$$

حيث

l = طول المدرجة الاسطوانية، mm.

σ_b = إجهاد الحشر المسموح به، $(105) = \text{MN/m}^2$ (Kgf/mm^2) من أجل الفولاذ الكرومي عالي القساوة فيه 0.85 % C.

$$k = \frac{4.64}{E} \sigma_b = \text{معامل استوائية المدرجة.}$$

d = قطر المدرجة mm وتؤخذ عادةً $0.15 D \rightarrow 0.1 D$

الجدول 5.12 قيم الحد e^{th}

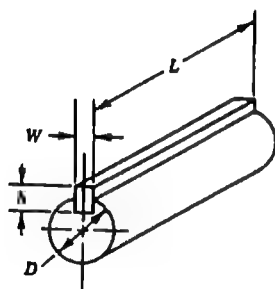
سير جلدي على				سير فولاذي على حديد الصب f = 0.18	نسبة زاوية التماس إلى زاوية المحيط $\frac{\theta}{2\pi}$
حديد صب		خشب			
بلل، رطوبة f = 0.38	قليل التشحيم f = 0.28	مشحّم كثيراً f = 0.12	قليل التشحيم f = 0.47		
1.27	1.19	1.08	1.34	1.12	0.1
1.61	1.42	1.16	1.81	1.25	0.2
2.05	1.69	1.25	2.43	1.40	0.3
2.60	2.02	1.35	3.26	1.57	0.4
2.76	2.11	1.38	3.51	1.62	0.425
2.93	2.21	1.40	3.78	1.66	0.45
3.11	2.31	1.43	4.07	1.71	0.475

سير جلدي على				سير فولاذي على حديد الصب $f = 0.18$	نسبة زاوية التماس إلى زاوية المحيط $\frac{\theta}{2\pi}$
حديد صب		خشب			
بلل، رطوبة $f = 0.38$	قليل التشحيم $f = 0.28$	مشحّم كثيراً $f = 0.12$	قليل التشحيم $f = 0.47$		
3.30	2.41	1.46	4.38	1.76	0.500
3.50	2.52	1.49	4.71	1.81	0.525
4.19	2.81	1.57	5.88	1.97	0.6
5.32	3.43	1.66	7.90	2.21	0.7
6.75	4.09	1.83	10.60	2.47	0.8
8.57	4.87	1.97	14.30	2.77	0.9
10.90	5.81	2.12	19.20	3.10	1.0

الخوابير

يعطى العزم المطبق على الخابور وفق الشكل بالعلاقة:

$$T = W L s_s \times \frac{D}{2}$$



الشكل 5.40 أبعاد الخابور

حيث

T = العزم، lb.in (N.m).

L = طول الخابور، in (cm).

W = عرض الخابور، in (cm).

h = ارتفاع الخابور، in (cm).

D = قطر المحور، in (cm).

S_s = إجهاد القص، psi (MPa).

S_c = إجهاد الضغط، psi (MPa).

وأيضاً يمكن إيجاد العزم بالعلاقة:

$$T = \frac{h}{2} \times L s_c \times \frac{D}{2}$$

حيث

$$s_c = \frac{4T}{hLD}$$

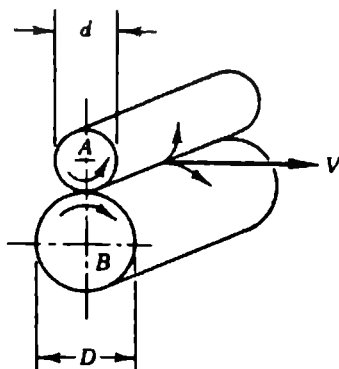
تصمم الخوابير عادةً بحيث تنهار أو تتحطم قبل انهيار المحور أو البطيخة (حاوية المحور) وذلك بسبب سهولة وقلة كلفة تبديل الخابور. يجب أن يكون ارتفاع الخابور حوالي ربع قطر المحور D .

وسنورد فيما يلي جدولاً يبين أبعاد الخوابير تابعة لقطر المحور.

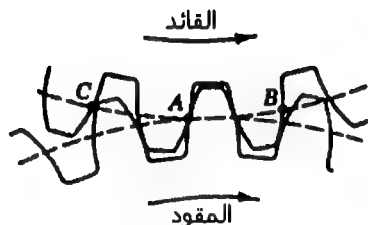
وهناك أنواع أخرى للخوابير مثل الخوابير ذات الرؤوس والخوابير التي على شكل نصف اسطوانة (خابور وودروف).

المسنتات

تملك النقطتان الموجودتان على كلٍّ من الاسطوانتين المبيتين في الشكل 5.41 نفس السرعة الخطية إذا افترضنا عدم وجود انزلاق. وهذا بالتالي يعني أن:



الشكل 5.41 اسطوانتي احتكاك



الشكل 5.42 أسنان المسنتين في حالة التشابك

عدد دورات المسنن $d \times A$ = عدد دورات المسنن $D \times B$.

ولمنع أي انزلاق بين الاسطوانتين فمن الأفضل وضع أسنان على الاسطوانتين دون تغيير القطرين الفعّالين كما هو مبين في الشكل 5.42، حيث يدل الخطان المنقطان على سطحي الاسطوانتين المبيتين في الشكل 5.41. وبالتالي فإن إضافة المسننات لن تغير المعادلة السابقة.

معادلات المسنن المستقيم

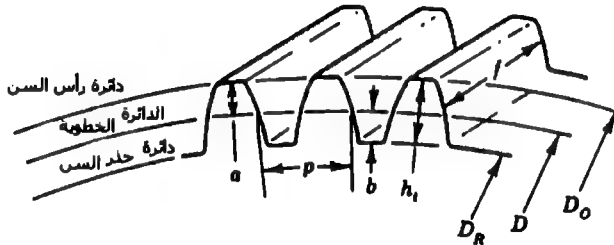
تطبق المعادلات التالية على كلا نوعي المسننات المستقيمة ذات زاوية الضغط 20° أو 14.5° ، وتكون الأبعاد مقدرة بالإنش أو بالسنتيمتر.

الدائرة الخطوية: وهي دائرة وهمية ممثلة بخط منقطع في الشكل 5.44.

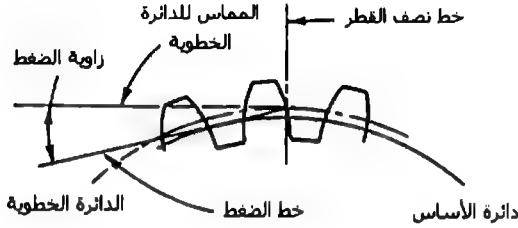
القطر الخطوي D : وهو قطر الدائرة الخطوية، وعند ذكر قطر المسنن فإننا نعني قطر الدائرة الخطوية هذا.

عدد الأسنان: عدد أسنان المسنن.

الخطوة القطرية P : عدد الأسنان في المسنن لكل إنش من القطر الخطوي، $P = n/D$. وإذا ذكرنا خطوة المسنن فإننا نعني الخطوة القطرية.



الشكل 5.43 تسميات المسنن المستقيم



الشكل 5.44 زاوية الضغط

ارتفاع رأس السن a : ويمثل المسافة القطرية بين الدائرة الخطوية ودائرة رأس المسنن،
 $a = 1/P$

عمق قعر السن b : وهو المسافة القطرية بين الدائرة الخطوية وقعر فراغ السن،
 $b = 1.157/P$

القطر الخارجي D_o : وهو قطر دائرة رأس السن:

$$D_o = D + 2a$$

وأيضاً

$$D_o = (n + 2)/P$$

قطر الجذر D_R : وهو قطر دائرة جذر السن، $D_R = D - 2b$.

العمق الكامل h_i : ويدعى بالارتفاع الكلي، $h_i = a + b$.

عرض الوجه f : وهو عرض سن المسنن.

الخطوة الدائرية p : وهي المسافة على محيط الدائرة الخطوية بين نقطة من سن والنقطة المماثلة لها من السن اللاحق.

$$p = \pi D/n$$

وبما أن $P = n/D$ فإن:

$$\pi = pP$$

العمق الفعّال (العامل) h_k : المسافة التي يتداخل فيها رأس السن لأحد المسننين مع رأس السن المقابل من أسنان المسنن الآخر، $h_k = 2a$.

السماكة الدائرية t_c : سماكة المسنن مقاسة على محيطه الدائرة الخطوية، $t_c = p/2$.

حمل القدرة. السرعة

تولّد القدرة المنقولة عبر المسنن الأول قوة على المسنن الثاني تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{33,000hp}{V}$$

حيث

F = القوة على سن المسنن، (Kg) .lb

h_p = الاستطاعة المنقولة بالحصان البخاري.

V = السرعة عند الدائرة الخطوية، (m/min) ft/min.

وتعطى السرعة عند الدائرة الخطوية بالعلاقة:

$$V = 0.262DN$$

حيث

N = سرعة الدوران، rpm.

متانة المسنن

تعتمد قدرة المسنن على نقل الاستطاعة على متانة السن باعتباره دعامة موثوقة من طرفها، ويعطى الحمل المسموح به بالعلاقة:

$$F_s = \frac{sfY}{P}$$

حيث

F_s = الحمل المسموح به، lb (Kg).

s = الإجهاد المسموح به، psi (MPa).

Y = عامل شكل السن.

يمكن إيجاد الإجهاد المسموح به وعامل شكل السن من المخططات والجداول الموجودة في المرجع الهندسية.

ولأخذ محولات الصدم وأخطاء التصنيع بعين الاعتبار يجب ضرب المعادلة السابقة بعامل K . ويعطى العامل K للمسننات ذات الجودة التجارية وعند السرعة على الأقل من 2000 ft/min (610 m/min) بالعلاقة:

$$K = \frac{600}{600 + V}$$

أما من أجل المسننات المنسوخة بدقة، وإذا كانت السرعة أقل من 4000 ft/min (1219 m/min) فيحسب العامل K وفق العلاقة:

$$K = \frac{1200}{1200 + V}$$

ومن أجل المسننات ذات الدقة العالية والمخلخة العاملة تحت سرعات أكبر من 4000 ft/min (1219 m/min) فيعطى عندها العامل K بالعلاقة:

$$K = \frac{78}{78 + \sqrt{V}}$$

الفوت (Backlash)

يُقدر خلوص الفوت لمعظم المستنات بحوالي $0.04/P$ ، وتعطى القوة القادرة على فصل مستنين معشقين ومحملين بالعلاقة:

$$S = F \tan \alpha$$

حيث

S = قوة الفصل، lb (N).

α = زاوية ضغط السن.

وسنورد فيما يلي جدولاً يعطي المودولات الموصى بها للمستنات المستقيمة والمائلة:

الجدول 5.13 المجموعات المقترحة للمودولات (mm)

الخيار 3	الخيار 2	المفضلة	الخيار 3	الخيار 2	المفضلة
(3)	(2)	(1)	(3)	(2)	(1)
(6.5)	7	8			1
	9	10		1.25	1.25
	11	12		1.375	1.5
	14	16		1.75	2
	18	20		2.25	2.5
	22	25	(3.25)	2.75	3
	28	32	(3.75)	3.5	4
	36	40		4.5	5
	45	50		5.5	6

وسنورد الآن جدولاً بالقيم المقترحة والموصى بها لقيم الخطوة القطرية للمستندات المستقيمة والمائلة، ويجب أن نأخذ قيم العمود الأول (المفضّل) قدر ما نستطيع:

الجدول 5.14 المجموعات المقترحة للخطوة القطرية

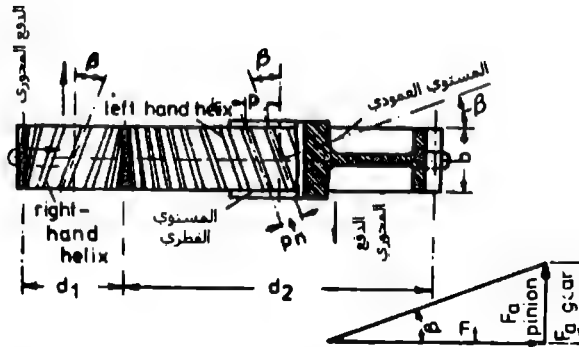
المفضلة	الخيار 2
20	
16	18
12	14
10	11
8	9
6	7
5	5.50
4	4.50
3	3.50
2.50	2.75
2	2.25
1.50	1.75
1.25	
1	
0.75	0.875
0.625	
0.50	

أما الآن فسنورد جدولاً يعطي نسبة النقل القياسية للمسننات i :

الجدول 5.15 نسبة المسننات القياسية $\left(i = \frac{Z_2}{Z_1}\right)$

مرحلة التخفيض					
أولى	ثانية	ثالثة	أولى	ثانية	ثالثة
1.25	8	40	4.0	22.4	125
1.40	9	45	4.5	25	140
1.60	10	50	5.0	28	160
1.80	11	56	5.6	31.5	180
2.00	12	63	6.3	35.5	200
2.24	12.5	71	7.1	40	250
2.50	14	80	8.0	45	280
2.80	16	90	9.0	50	315
3.15	18	100	-	-	355
3.55	20	112	10	-	400

المسنتات المائلة (Helical Gear)



الشكل 5.45 المسنتات المائلة

الخطوة الدائرية العمودية

$$P_n = P \cos \beta = \frac{\pi d}{z} \cos \beta = \pi m \cos \beta$$

الخطوة القطرية العمودية

$$P_n = \frac{P}{\cos \beta} = \frac{z}{d \cos \beta}$$

المودول العمودي

$$m_n = m \cdot \cos \beta = \frac{d}{z} \cos \beta$$

عدد الأسنان

$$z = \frac{d \cos \beta}{m_n} = d \cdot P_n \cos \beta$$

قطر الدائرة الخطوية

$$d = \frac{z}{P} = z m = \frac{z}{P_n \cos \beta} = \frac{z m_n}{\cos \beta}$$

قطر دائرة القعر

$$d_f = d - 2 (t_{fn} + t_{cn} - K'_n) m_n$$

حيث

$$t_{fn} = t_f / \cos \beta$$

$$t_{cn} = t_c / \cos \beta$$

$$K'_n = K' / \cos \beta$$

دائرة الرأس أو القطر الخارجي

$$d_o = d_f + 2h$$

h ارتفاع المسنن

ويعطى الدفع المحوري بالعلاقة

$$F_s = F_t \cdot \tan \beta$$

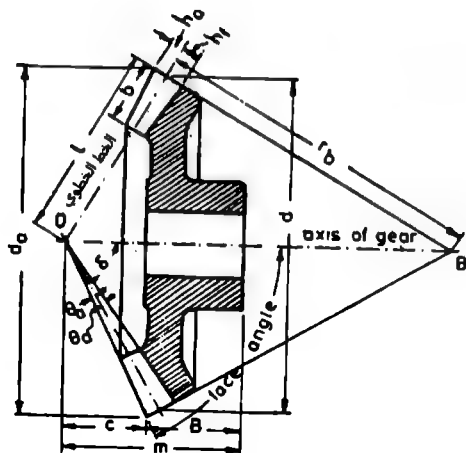
ويعطى عرض المسنن ذو الأسنان المائلة وفق علاقة Fellow التجريبية:

$$b = \frac{(1.1)\pi m}{\tan \beta} = \frac{1.1\pi m_n}{\sin \beta}$$

ويمكن إيجاد عرض المسنن أيضاً بحيث

$$b = 12.5 m_n \quad \text{to} \quad 20 m_n$$

المسنتات المخروطية



الشكل 5.46 تعاريف وأبعاد المسنن المخروطي

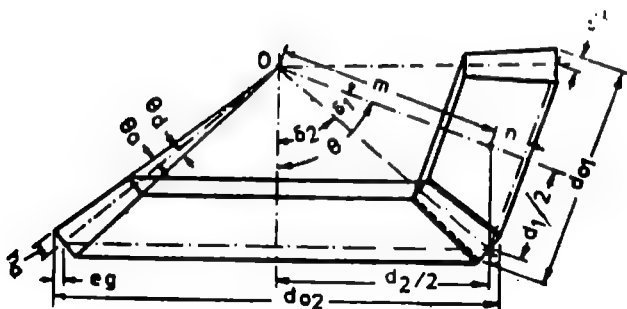
الجدول 5.17 خصائص السن المخروطي

العناصر	الرمز	المسنن	المسنن الصغير
العمق الاسمي للرأس	h_a	m	m^*
العمق الاسمي للقعر	h_f	$1.157 m$	$1.157 m^*$
عمق السن الكلي	h	$2.157 m$	$2.157 m$
زاوية الرأس	θ_a	m/L	m/L
زاوية العمق	θ_d	$1.157 m$	$1.157 m$
		L	L

* عمق القعر للمسنن الكبير يساوي عمق الرأس للمسنن الصغير وكذلك عمق رأس المسنن الصغير يساوي عمق المسنن الكبير لخط الخطوة المشترك. سيكون عمق رأس السن للمسنن الصغير أكبر من عمق قعره

علاقات الزوايا:

(a) المسننان المخروطيان ذوا الزاوية الحادة:



الشكل 5.47 مسننات مخروطيان بزاوية حادة

الزاوية الخطوية للمسنن الصغير:

$$\begin{aligned} \tan \delta_1 &= \frac{d_1 \cdot \sin \theta}{d_2 + d_1 \cos \theta} \\ &= \frac{\sin \theta}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \theta} \\ &= \frac{\sin \theta}{i + \cos \theta} \end{aligned}$$

الزاوية الخطوية للمسنن الكبير:

$$\tan \delta_2 = \frac{d_2 \cdot \sin \theta}{d_1 + d_2 \cos \theta}$$

$$= \frac{\sin \theta}{\frac{z_1}{z_2} + \cos \theta}$$

$$= \frac{\sin \theta}{\frac{1}{i} + \cos \theta}$$

الزاوية المحددة للرأس:

$$\tan \delta_a = \frac{2 h_{a1} \sin \delta_1}{d_1}$$

$$= \frac{2 h_{a2} \sin \delta_2}{d_2}$$

الزاوية المحددة للقعر:

$$\tan \theta_d = \frac{2 h_{f1} \sin \delta_1}{d_1}$$

$$= \frac{2 h_{f2} \sin \delta_2}{d_2}$$

حيث

h_{a1}, h_{a2} = عمق الرأس للمسنن الصغير والكبير على التوالي، mm.

h_{f1}, h_{f2} = عمق القعر للمسنن الصغير والكبير على التوالي، mm.

القطر الخارجي للمسنن الصغير =

$$d_{o1} = d_1 + 2 h_{a1} \cdot \cos \delta_1$$

القطر الخارجي للمسنن الكبير =

$$d_{o2} = d_2 + 2 h_{a2} \cdot \cos \delta_2$$

(b) المسننان المخروطيان المتعامدان:

الزاوية الخطوية للمسنن الصغير

$$\tan \delta_1 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{i}$$

الزاوية الخطوية للمسنن الكبير

$$\tan \delta_2 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = i$$

خصائص المسننات المخروطية بحدود مكافئة للمسنن المستقيم.

قطر الدائرة الخطوية المكافئة

$$d_e = d / \cos \delta$$

قطر الدائرة الخارجية المكافئة

$$d_{oe} = d_o / \cos \delta$$

نسبة المسنن المكافئة

$$i_e = i^2$$

الأسنان المكافئة أو عدد الأسنان لمسننات مخروطية مستقيمة

$$z_e = z / \cos \delta$$

عرض وجه المسنن

$$b \geq 6 \text{ m}$$

$$b \leq 10 \text{ m}$$

$$b \leq L/3$$

حيث

L هي المسافة المخروطية

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{d_1^2 + d_2^2} = \frac{d_2}{2 \sin \delta_2}$$

$$= \frac{d_1}{2 \sin \delta_1}$$

حيث

d_1 و d_2 القطرين الخطوين على القطر الكبير للمسنن الكبير والصغير على التوالي.
وسنورد الآن جدولاً يبين المجموعة المقترحة لمودولات المسننات المخروطية وكذلك
الخطوة القطرية:

المجدول 5.17 المودولات المقترحة للمسننات المخروطية

الخطوة 2	المفضلة
	1
1.125	1.25
1.375	1.5
1.75	2
2.25	2.5
2.75	3
3.5	4
4.5	5
5.5	6
7	8
9	10
11	12
14	16

الخيار 2	المفضلة
18	20
22	25
28	32
36	40
45	50

الجدول 5.18 القيم المقترحة للخطوة القطرية للمسننات المخروطية

الخيار 2	المفضلة
	20
	16
18	12
14	10
11	8
9	6
7	5
5.50	4
4.50	3
3.50	2.50
2.75	2
2.25	1.50
1.75	1.25
	1
	0.75
0.875	0.625
	0.50

براغى ACME

يعطى العزم اللازم لتطبيق قوة معينة برغى Acme بالعلاقة:

$$T = \frac{Qd}{2} \left(\frac{\cos \alpha \tan \lambda + \mu}{\cos \alpha - \mu \tan \lambda} \right)$$

حيث

T = العزم، lb.in (N.m).

Q = الحمل أو القوة، lb (N).

d = القطر الخطوي، in (mm).

λ = زاوية التحميل.

μ = معامل الاحتكاك.

ويعطى العزم المطلوب لتطبيقه للتغلب على الاحتكاك عند الجلبة الدافعة بالعلاقة:

$$T_c = \frac{\mu Q d_c}{2}$$

حيث

T_c = العزم، lb.in (N.m).

d_c = القطر الوسطى للجلبة الدافعة، in (mm).

ويعطى عامل الاحتكاك لجلبة فولاذية على مدرجة برونزية دافعة حوالي 0.1 عند البداية و0.08 أثناء التشغيل. إذا تم استخدام مدرجة ذات كرات لعملية الدفع فسيصبح الاحتكاك صغيراً جداً بالنسبة للاحتكاك مع البرغى وبالتالي سيهمل.

ويكون العزم الكلي المطلوب لتحقيق القوة Q عبارة عن مجموع العزمين الموجودين في المعادلتين السابقتين.

الأعمدة في أجزاء الآلات

غالباً ما توضع الأعمدة في أجزاء الآلات لنقل الحمولات المحورية. وإذا كان الحمل المحوري عبارة عن حمل شد عندها تطبق العلاقة $S = P/A$ ، أما إذا كان الحمل المحوري حملاً مركباً فيجب عندها استخدام المعادلة المناسبة لتلك الحالة.

وتعطى معادلة Euler المحددة للحمولة الحرجة لأعمدة الاسطوانات ذات المقطع المنتظم كما يلي:

$$F_{cr} = \frac{C\pi^2 EA}{(L/k)^2}$$

حيث

F_{cr} = الحمل الحرج الذي يسبب الانحناء أو الالتواء.

C = معامل يعتمد على شروط التحميل (انظر المراجع الهندسية لتحديد قيمته).

E = عامل المرونة، psi.

A = مساحة مقطع العرضي، in^2 .

L = طول العمود، in.

$k = \sqrt{I/A}$ نصف قطر الدوران الأصغري، حيث I = عزم العطالة الأصغري حول محور الانحناء، ويأخذ k في حالة المقطع الدائري القيمة، $k = D/4$ ، وفي حالة كون المقطع مستطيل الشكل يصبح $k = h\sqrt{3}/6$ ، حيث h هو البعد الصغير للمستطيل.

ويعطى الحمل الحرج للأعمدة متوسطة الطول ذات المقاطع المنتظمة عبر عدة معادلات، إحداها معادلة J.B.Johnson التالية:

$$F_{cr} = s_y A \left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E} \right]$$

حيث s_y حد الخضوع، psi. وتملك باقي الرموز نفس المفاهيم عند استخدامها في معادلة Euler السابقة، وتعتمد قيمة المعامل C على الشروط المطبقة عند النهايات، كما في الشكل 5.48.

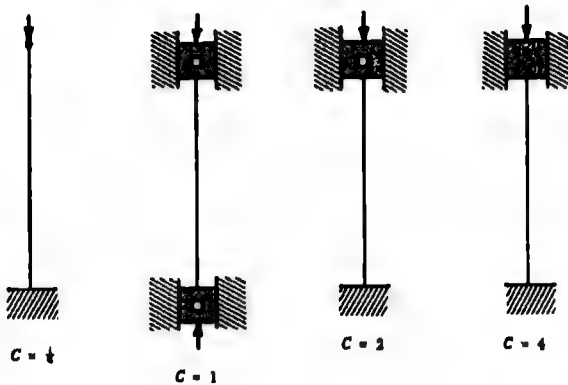
نحصل على الحمل الآمن عبر تقسيم الحمل الخارج على عامل الأمان N وتصبح المعادلتان كما يلي:

الحمل الآمن F وفق معادلة Euler:

$$F = \frac{F_{cr}}{N} = \frac{C\pi^2 EA}{N(L/k)^2}$$

الحمل الآمن F ، وفق معادلة Johnson:

$$F = \frac{s_y A}{N} \left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E} \right]$$



الشكل 5.48

الجدول 5.19

C	E, psi	S _y , psi	(L/k) ²	L/k
1/4	3 × 10 ⁶	80.000	1.849	43
		70.000	2.113	46
		60.000	2.465	50
		50.000	2.958	54
		40.000	3.697	61
1	30 × 10 ⁶	80.000	7.394	86
		70.000	8.451	92
		60.000	9.860	99
		50.000	11.832	109
		40.000	14.789	121
2	30 × 10 ⁶	80.000	14.789	121
		70.000	16.902	130
		60.000	19.719	140
		50.000	23.663	154
		40.000	29.579	172

إذا كانت قيمة L/k أقل من القيمة $\sqrt{2C\pi^2 E / s_y}$ فعليك استخدام معادلة Johnson التي تقبل انخفاض النسبة حتى $L/k = 0$.

يمكن استنتاج النسبة L/k التي نحدد وفقها استخدام معادلة Euler أو استخدام معادلة Johnson عبر نسب الحمل الحرج من معادلة Euler على الحمل الحرج من معادلة Johnson:

$$\frac{C\pi^2 EA}{(L/k)^2} = s_y A \left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E} \right]$$

بالتالي

$$L/k = \sqrt{\frac{2C\pi^2 E}{s_y}}$$

عندما تكون قيمة L/k أكبر من القيمة الناتجة من هذه العلاقة فعلياً استخدام معادلة Euler، أما إذا كانت أصغر فعلياً استخدام معادلة Johnson. ويعطي الجدول 5.1 قيم L/k وفق عدة قيم لحد الخضوع وحالة تثبيت طرفي العمود.

وثوقية عناصر الآلات والأنظمة

تعد الوثوقية خاصة من خواص العنصر، أو الأنظمة المكونة من عدة عناصر، والمعبر عنها بقدرة ذلك العنصر على أداء مهمته ضمن بيئة محددة ولزمن محدد. لقد أصبحت تنبؤات الوثوقية فرعاً مستقلاً ومضبوطاً من فروع التقنيات الصناعية. ويؤدي مهندسوا الوثوقية دوراً هاماً في تقليل الأعطال المكلفة وتصحيح خطط وجداول الصيانة والإصلاح.

ملخص للمعادلات ذات الصلة بموضوع الوثوقية

من أجل نسبة عطل تناسبية ثابتة:

$$R = e^{-\lambda t}$$

$$R + Q = 1$$

$$Q = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$N_s = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_f = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

$$m = \frac{1}{\lambda}$$

$$R = e^{-t/m}$$

$$Q = 1 - e^{-t/m}$$

$$N_s = N_0 e^{-t/m}$$

$$N_f = N_0 (1 - e^{-t/m})$$

حيث

R - الوثوقية.

Q - عدم الوثوقية.

λ - نسبة العطل التناسبي (أي تناسب نسبة العطل مع N_s).

N_s - عدد العناصر الحية (الناجية أو الباقية).

N_f - عدد العناصر الميتة (المعطلة).

N_0 - العدد الابتدائي للعناصر الحية.

m - متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF).

t - الزمن.

ونحدد قيمة m أو (MTBF) بعد إجراء عملية اختبار بالعلاقة:

$$m = \frac{\text{عدد ساعات العمل الكلية}}{\text{عدد الأعطال}}$$

ويعطى الانحراف المعياري σ لمتغير x بتوزيع طبيعي بالعلاقة:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - x_m)^2}{n}}$$

حيث

x_m هي القيمة المتوسطة لعدد عينات n من المتغير x .

تحدد القيمة المتوسطة لزمن الاهتلاك ضمن تجربة معينة بالعلاقة:

$$M = \frac{\text{مجموع العناصر الحية (غير المعطلة)}}{\text{عدد العناصر}}$$

ومن أجل متغير بتوزيع أسي نجد:

$$\text{حد الثقة العلوي} = \frac{2nm}{\chi^2_{1-\alpha/2, n}}$$

$$\text{حد الثقة السفلي} = \frac{2nm}{\chi^2_{\alpha/2, n}}$$

وإذا أخذنا مستوى ثقة معطى بالنسبة المئوية $(1 - \alpha)$ 100، حيث n تشير إلى عدد الأعطال، كما وتشير m إلى تقديرات للقيمة المتوسطة للمتغير، و χ^2 يشير إلى قيمة تربيعية (تعطى وفق جداول) تتعلق بالمتغيرين n و α أو $1 - \alpha/2$.

وإذا كان العنصر أو الوحدة يشكل جزءاً من نظام فيمكننا كتابة:

$$\frac{m_c}{m_s} = \frac{t_c}{t_s}$$

$$m_s = \frac{m_c}{d}$$

حيث

m_c = متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF) للعنصر خلال ساعات عمل العنصر.

m_s = متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF) للعنصر خلال ساعات عمل النظام.

t_c = ساعات عمل العنصر.

t_s = ساعات عمل النظام.

$d = \frac{t_c}{t_s}$ = دورة الخدمة.

ويعطى احتمال حصول كلا الحدثين x و y معبراً عنها بالرمز P_{xy} بالعلاقة:

$$P_{xy} = P_x P_y$$

ونعبر عن احتمال حدوث أحد الحدثين x و y بالرمز P_{x+y} بالعلاقة:

$$P_{x+y} = P_x + P_y - P_x P_y$$

حيث

P_x = احتمال حدوث الحدث x .

P_y = احتمال حدوث الحدث y .

وتشير المعادلات التالية إلى الأنظمة التسلسلية والتفرعية، وتدل الرموز على نفس مفاهيمها في المعادلات السابقة مثل الوثوقية، الاحتمال، نسبة العطل، الخ. مع وجود دلائل إضافية إذ تشير اللاحقة s إلى التسلسلي، وتشير اللاحقة p إلى التفرعي، وتشير الأرقام 1, 2, 3, إلى العناصر أو الوحدات الجزئية.

يظهر الشكل 5.49 منحنيات الوثوقية، للأنظمة التسلسلية والتفرعية.

$$R_s = R_1 R_2 \dots$$

$$Q_s = Q_1 + Q_2 - Q_1 Q_2$$

$$Q_s = 1 - R_s$$

$$R_p = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

$$Q_p = Q_1 Q_2$$

$$Q_p = 1 - R_p$$

$$R_s = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots)t}$$

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots$$

$$m_s = \frac{1}{\lambda_s}$$

$$R_s = e^{-n\lambda t}$$

$$\lambda_s = n\lambda$$

$$m_s = \frac{1}{n\lambda}$$

$$R_p = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 - R_1 R_2 - R_2 R_3 + R_1 R_2 R_3$$

$$R_p = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} + e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} \\ + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}$$

$$m_p = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

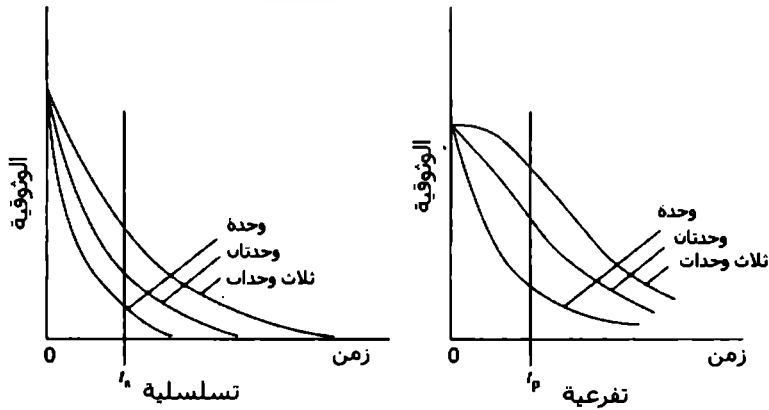
$$m_p = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} \\ - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

$$m_p = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda}$$

حيث تشير n الموجودة في المعادلات السابقة إلى عدد العناصر أو الوحدات الجزئية التي تملك نسب أعطال متساوية.

ويعطى عامل الاستخدام (الانتفاع) U بالنسبة لنظام وفق العلاقة:

$$U = \frac{\text{زمن التشغيل (العمل)}}{\text{زمن التشغيل} + \text{زمن الصيانة} + \text{زمن التعطيل}}$$



الشكل 5.49 منحنيات الوثوقية للأنظمة التسلسلية والتفرعية

يعطى عامل التوفر (وهو عامل الاستخدام الأعظمي) A بالعلاقة:

$$A = U_{\max} = \frac{\text{زمن التشغيل (العمل)}}{\text{زمن التشغيل} + \text{زمن الصيانة الأعظمي}}$$

ومن أجل أي مجموعتين من حالات العمل x و m نستطيع كتابة العلاقة بين الجهدين V_x و V_m والحرارة t_x و t_m ونسبتي العطل λ_x و λ_m على التوالي على الشكل التالي:

$$\lambda_x = \lambda_m \left(\frac{V_x}{V_m} \right)^n K^{t_x - t_m}$$

حيث يُمثل n و K هنا ثابتين وفق مجال محدد من الشروط ويمكن تحديدهما كما يلي:

$$K = \frac{\lambda_x}{\lambda_m} \frac{1}{t_x - t_m}$$

وذلك من أجل اختبار بمجهّد ثابت، أما إذا كان الاختبار بدرجة حرارة ثابتة (مع ثبات درجة الحرارة) فإن:

$$n = \frac{\ln(\lambda_x / \lambda_m)}{\ln(V_m / V_x)}$$

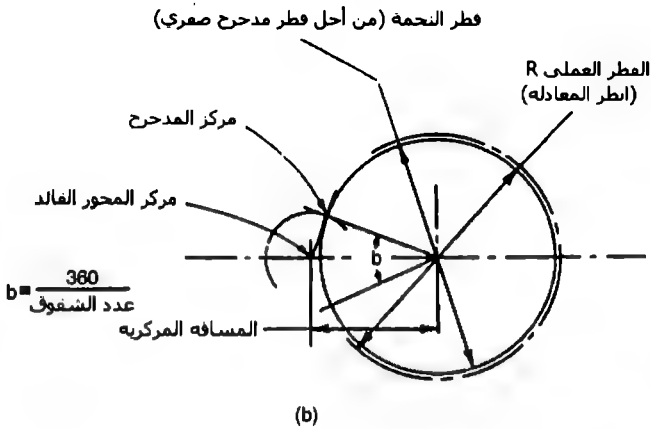
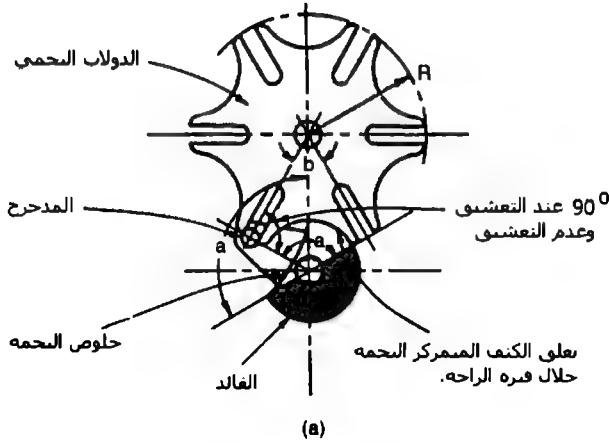
تصميم دولاب GENEVA

لقد استخدم دولاب جنيفا بالأصل لإيقاف أو منع التدوير الزائد لنوابض الساعات، وذلك عبر عدم شق أحد الشقوق وبالتالي سيكون عدد مرات تدوير المحور محدودة. أما الآن فيعتبر دولاب جنيفا واحداً من أكثر نواقل الحركة استخداماً في الحركات الدورانية المتقطعة ذات السرعات العالية.

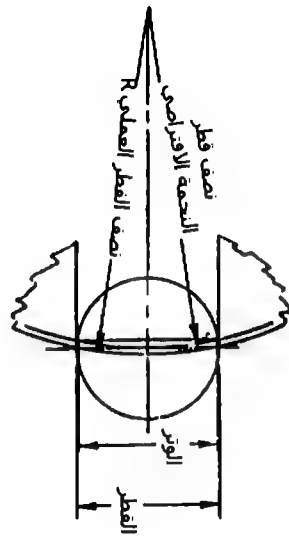
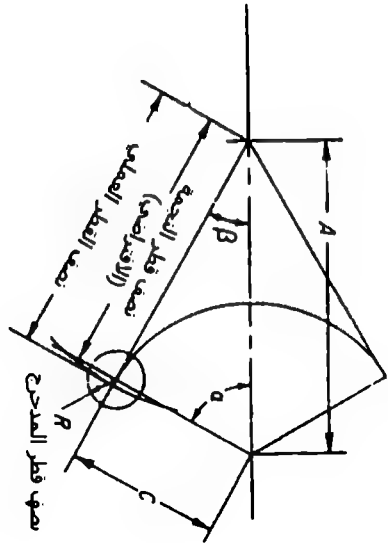
معادلات التصميم

نستطيع حساب التوضع الزاوي عند أي لحظة والسرعة والتسارع والقطر العملي للدولاب النحوي من المعادلات التالية.

ولكن سنعرض أولاً الشكل 5.51 الذي يوضح معنى الرموز التي ستستخدم في المعادلات.



الشكل 5.50 مكونات دولاب GENEVA. (a) آلية GENEVA الكاملة، (b) مخطط يوضح الخطوة الأولى في التصميم.



الشكل 5.51 الرموز المستخدمة في معادلات دولاب Geneva.

المسافة المركزية:

$$A = C M$$

حيث

$$M = \frac{1}{\sin(180 / \text{no. of slots})}$$

الإزاحة الزاوية:

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha}{M - \cos \alpha}$$

السرعة الزاوية:

$$\begin{aligned} &= \frac{d\beta}{dt} \\ &= \omega \frac{M \cos \alpha - 1}{1 + M^2 - 2M \cos \alpha} \end{aligned}$$

التسارع الزاوي rad/s^2 :

$$\begin{aligned} &= \frac{d^2\beta}{dt^2} \\ &= \omega^2 \frac{M \sin \alpha (1 - M^2)}{(1 + M^2 - 2M \cos \alpha)^2} \end{aligned}$$

وسيكون التسارع أعظماً عند تحقيق:

$$\cos \alpha = \pm \sqrt{\left(\frac{1 + M^2}{4M} \right)^2 + 2} - \frac{1 + M^2}{4M}$$

وسيحادث التسارع الأعظمي وبالتالي التاكل الأعظمي عند حوالي ثلث أو ربع المسافة من طول الشق من جهة حرف الدولاب.

ويعطى القطر العملي للدولاب النحوي بالعلاقة:

$$2R = \sqrt{A^2 - C^2 + \mu^2}$$

معادلات الإجهاد للأسطوانات الرقيقة

عندما تكون نسبة نصف القطر الخارجي إلى نصف القطر الداخلي من 1.14 إلى 1، فعندها تصنف هذه الاسطوانة ضمن الاسطوانة الرقيقة. ستكون الإجهادات غير منتظمة التوزيع على كامل نصف القطر وستكون أعظمية عند نصف القطر الداخلي، وتُحدّد تغيرات الإجهاد بالتحليل الرياضي وتعطي قيمة قريبة جداً من الاختبارات الحقيقية. وهناك عدة معادلات تحسب قيم الإجهاد عند الجدار الداخلي عند شروط نهايات مختلفة ولمواد مختلفة، وتعرف كل معادلة باسم واضعها. وسنقدم في الجدول التالي أربع معادلات لأربعة مؤلفين.

المؤلف	المعادلة	الافتراضات
Lame	$S_r = a + \frac{b}{r^2} = p \left(\frac{1+R^2}{R^2-1} \right) = p \left(\frac{r_o^2+r_i^2}{r_o^2-r_i^2} \right)$	للمواد القصيفة ولنهايتين صافيتين
Barlow	$S_r = \frac{PD}{2t} = p \left(\frac{r_o}{t} \right) = p \left(\frac{R}{R-1} \right)$	نهايتين صافيتين
Clavertino	$S_r = (1-2m)\alpha + \frac{1+m}{r_i^2} b$	للمواد المطيلية ولنهايتين صافيتين
Birmie	$S_r = (1-m)\alpha + (1+m) \frac{b}{r_i^2}$ $= \frac{0.4}{R^2-1} + \frac{1.3R^2}{R^2-1} = p \left(\frac{0.4+1.3R^2}{R^2-1} \right)$ $= p \left(\frac{0.7}{R^2-1} + \frac{1.3R^2}{R^2-1} \right) = p \left(\frac{0.7+1.3R^2}{R^2-1} \right)$	للمواد المطيلية ولنهايتين صافيتين

الملاحظات

in - D : القطر الخارجي،
 p - الضغط الداخلي،
 in - R : نصف القطر الداخلي،

in - r_i : نصف القطر الداخلي،
 in - r_o : الإجهاد العمل،
 in - S : الإجهاد العمل،
 in - m : نسبة بواسون (0 للزلازل)،

$$R = \frac{r_o}{r_i}$$

$$a = p \left(\frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$


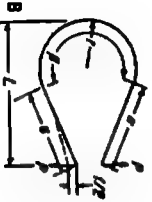

$$b = p \left(\frac{r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

in - m : نسبة بواسون (0 للزلازل)،
 in - r_i : نصف القطر الداخلي،
 in - r_o : الإجهاد العمل،
 in - S : الإجهاد العمل،
 in - m : نسبة بواسون (0 للزلازل)،

المعادلات : مقارنته بين المعادلات

المعادلات التصميمية للنوابض المنحنية

تصمم النوابض المنحنية عادةً بمعادلات تعتمد على الطول المفتوح للنابض مهملين تأثير الانحناء، وتعتبر هذه المعادلات غير دقيقة. تعتمد الطريقة الجديدة على نفس المفهوم ولكنها تصبح أدق عبر إضافة عامل تصحيح متعلق بالانحناء كما في الجدول التالي:

نوع التماس	أشكال التماس	قوة التماس وحسابات الإجهاد
A		$F_1 = \frac{KP^2}{3EI} (m + \beta)^2$ <p>إجهاد $\sigma = \beta$ إجهاد K</p>
B		$F_2 = \frac{2KP^2}{3EI} \left(m + \frac{\beta}{2} \right)^2$ <p>إجهاد $\sigma = \beta/2$ إجهاد K</p>
C		$F_3 = 2F_1 = \frac{4KP^2}{3EI} \left(m + \frac{\beta}{2} \right)^2$ <p>إجهاد $\sigma = \beta/2$ إجهاد K</p>

المجدول 5.21 : معادلات التواء المنحنية

$$F_1 = F_2 = \frac{P}{3EI} \left[2Kr^2 \left(m + \frac{\theta}{2} \right)^2 + (v - w)^2 \right]$$

حيث $a = \beta/2$ لإيجاد K

$$P = \frac{3w}{\lambda} = \frac{P\lambda}{S}$$

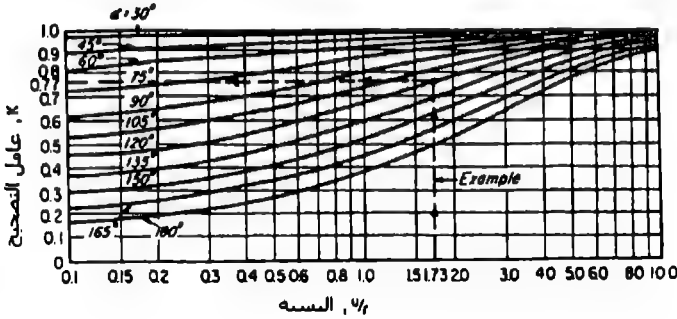
الشرط الأول	الشرط الثاني	λ
$m \geq v$	$m - v < w + r$	$m + r$
$m < v$	$v - m > w + r$	$m + r$
$m < v$	$v \leq r$	$v - m$
$m = 0$	$v > r$	r
$m = 0$		v

الجدول 5.21 : /تابع/

المصطلحات

b = عرض النابض، D - mm قطر النابض، E - mm عامل يونغ، E - kg/mm²، h - mm سماكة النابض،
 l - mm عزم العطالة، m - mm عامل تصحيح، L = ذراع العزم، m - mm، $m = \frac{u}{r}$ ، P = قوة النابض، Kg ، r = نصف قطر
 الانحناء، S - mm معيار المقطع، u - mm طول المقطع المستقيم عند نهاية النابض المحركة، v - mm طول المقطع المستقيم عند
 نهاية النابض الثابتة، w - mm وسيط لرسم K ، β - deg زاوية انحناء النابض، λ = ذراع العزم، σ - mm إجهاد الانحناء
 الأعظمي، Kg/mm^2 .

وللحصول على نتائج دقيقة يجب أن لا تتجاوز النسبة h/r للنوابض المستوية و D/r للنوابض ذات المقطع الدائري القيمة 0.6.



الشكل 5.52 : عامل تصحيح انحناء النابض

تتوافق النتائج التحريبية مع الانحرافات المحسوبة وفق هذه المعادلات. فمثلاً تم حساب انحراف النابض D وكان ضمن 8 % من الانحراف الحقيقي، بينما سيعطي حساب الإجهاد نسبة خطأ 100 % في حال إهمال الانحناء. وكما رأينا فقد تم تصنيف النوابض المنحنية وفق خمسة أنواع رئيسية، ويمكن حساب أنواع أعقد غير تقسيم النابض وفق هذه الأنواع الرئيسية.

لقد قام بوضع هذه المعادلات وعوامل التصحيح كلٌّ من JoachimPalm و Thomas Klaus بمدينة ميونخ في ألمانيا.

المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة أثناء تصميم المدرجات (البيليات)

تتطلب عملية تصميم المدرجات عدداً من المعادلات الهيدروديناميكية ترتبط بعلم الموائع وتدفق السوائل والقدرة والضغط والعزم ولزوجة السائل وكثافة السائل. ويقدم الجدول التالي بيانات مفيدة عن هذه المفاهيم وفق الجملتين SI و USCS.

نظام الوحدات	المعادلة أو القيمة	الرمز	الوحدة	الاسم
USCS	$\frac{\text{lb} \times \text{s}^2}{\text{ft}}$	M	وحدة الكتلة البريطانية	الكتلة
SI	$\frac{\text{kg} \times \text{s}^2}{\text{m}}$	M	وحدة الكتلة المبرية	الكتلة بالكيلوجرام
SI	$\frac{\text{dyn} \times \text{s}^2}{\text{cm}}$	M	الكتلة بالدينام	الكتلة بالدينام
USCS	32.174 (في لندن) 9.807 (في باريس)	g	ثابت الجاذبية الأرضية	ثابت الجاذبية الأرضية
SI	$\frac{1}{981} \text{ g}$	P	الدينام	القوة
USCS	$\frac{1}{32.174}$	P	Poundal	
USCS	62.35 lb أو 0.433 lb/in ²	H	ft	الضغط
USCS	350 ft - lb/s or 33,000 ft - lb/min	N	hp	العمل المقتر

الجدول 5.22 : المعادلات الفيزيائية الميكانيكية المفيدة في عملية تصميم المحركات

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	مصادر الواحدات
العمل المتخذ	hp	N	$\frac{\text{ft}^3 \times \text{head} \times \text{sp gr}}{8.8}$ or $\frac{\text{gal} \times \text{head} \times \text{sp gr}}{3960}$	USCS
	hp	N	$\frac{\text{ft}^3 \times \text{hp} \times \frac{1}{\text{ft}^3}}{\text{min} \times \frac{1}{33,000}}$ or $\frac{\text{gal} \times \text{hp} \times \frac{1}{\text{min}}}{1714}$	USCS
الوزن	lb · ft	T	$\frac{\text{hp} \times 33,000}{\text{rpm} \times 2\pi} = \frac{5250 \text{ hp}}{\text{rpm}}$	USCS
الكثافة	$\frac{\text{الكتلة}}{\text{وحدة الحجم}}$ $\frac{\text{الكتلة}}{\text{وحدة الحجم}}$	P	$\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \frac{\text{ft}^3}{\text{ft}^3} = \frac{\text{slugs}}{\text{ft}^3}$ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	SI
اللزوجة الماطية وواحدات اللزوجة USCS	$\frac{\text{الكتلة}}{\text{الزمن} \times \text{الطول}}$	μ	$\frac{\text{slugs}}{\text{ft} \cdot \text{s}} = \frac{\text{lb} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2}$ 1 unit of $\frac{\text{slugs}}{\text{ft} \cdot \text{s}} = 178.69 \text{ P}$ $\frac{\text{lb} \cdot \text{min}}{\text{in}^2} = 4,136,000 \text{ P}$ $\frac{\text{poundal} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2} = 14.88 \text{ P}$	USCS

الجدول 5.22 : المعادلات الميكانيكية الفيزيائية في عملية تصميم المخرجات /تابع/

اسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الوحدات
الرورلة المطلقة بواحد الحالة الأولية SI	P	Z	$\frac{1}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$ $\frac{1}{100} P$	SI
	cp		981 P	
	$\frac{\text{g} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3}$			
الرورلة الحركية	مساحة رور	v	$v = \frac{\mu}{P} = \frac{\text{الرورلة المطلقة}}{\text{الكثافة}}$ $\frac{1}{P}$ density $\frac{1}{100} St$	USCS and SI
	$St, \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$			SI
	cSt			
نولس Saybolt العالمية		V	للحيل من اجماله SUS إلى السبينوكس When SUS ≤ 100 cSt = 0.226 SUS. - 195/ SUS. When SUS. = 100 cSt = 0.220 SUS. - 135 /SUS.	SI
رورلة بوعية	لا اردي		نسبة الرورلة المطلقة لأي سائل في رورلة اجماله عند الرورلة 20°C	فيها مطلقة
رورلة اجماله عند الرورلة 20°C	cp	Z	$Z = 1 \text{ cp}$	SI

الجدول 5.22 : المعادلات الفيزيائية الفيزياء في عملية تصميم المخرجات /تابع/

اسم	الوحدة	الرمز	المادة أو القيمة	نظام الوحدات
السيولة	$\frac{\text{دفع} \times \text{طول}}{\text{كتلة}}$	ϕ	$\phi = \frac{1}{\mu}$ ولفى مطلوب للزوجة الصائفة	SI و USCS
رقم رينولدز	لا بعدى	N_R	$N_R = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu}$ μ = لزوجة المائع ν = سرعة المائع ρ = الكثافة d = قطر الأنبوب μ = اللزوجة الصائفة ν = اللزوجة الحركية	قيمة صائفة
أرقام رينولدز اللزوجة الحركية داخل الأنبوب	لا بعدى	N_{R_i}	$N_{R_i} = 2320$ = رقم رينولدز الحدي الذي يفصل بين الجريان الصفائحي والمضطرب $N_{R_i} > 2320$ = جريان مضطرب $N_{R_i} < 2320$ = جريان صفائحي From $N_{R_i} = 1920$ to 4000 = جريان غير مستقر	قيمة صائفة
معامله فقدان الطاقة بالاحتكاك للريان داخل الأنبوب	f or m	H_f	$H_f = f \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g}$ $H_f = f \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g}$ v = السرعة , ft/s or m/s d = قطر الأنبوب , ft or m l = طول الأنبوب , ft or m g = ثقل الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s ² or m/s ² f = معامل التدفق	SI و USCS
معامل التدفق للريان الصفائحي	لا بعدى	f	$f = \frac{64}{N_{R_i}}$ N_{R_i} = رقم رينولدز للريان الصفائحي	قيمة صائفة

الجدول 5.22 : المعادلات المبدئية للمحرك / تابع

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظائر الواحدات
معامل التثقيب الأنيوب جديد مب بطيخ ومعلق ذكري	لا بعدى	f	$f = \frac{0.214}{\sqrt{N_p}}$ جزيات مضطرب $f = \frac{64}{N_p}$ جزيات مضطرب	لحمه مطالية
معامل التثقيب الأنيوب زخم جدا ومعلق ذكري	لا بعدى	f	$f = \frac{0.316}{\sqrt{N_p}}$ جزيات مضطرب $f = \frac{64}{N_p}$ جزيات مضطرب	لحمه مطالية
معامل التثقيب الأنيوب جزيات الانعكاسية	لا بعدى	f	$f = \frac{0.316}{\sqrt{N_p}}$ جزيات مضطرب $= 0.054$ $f = \frac{64}{N_p}$ جزيات مضطرب	لحمه مطالية
رقم رينولدز الماء عند درجة حرارة 20°C	لا بعدى	N_R	$N_R = 1000d$ $v = \text{السرعة} \cdot \text{cm/s}$ $d = \text{قطر الأنبوب} \cdot \text{cm}$	لحمه مطالية
نصف المعدج (Sommerfeld)	لا بعدى	S	$S = \left(\frac{D}{c}\right)^2 \frac{\mu}{p}$ $D = \text{قطر المعدج}$ $c = \text{خارج المعدج}$ $\mu = \text{لزوجة المعدج}$ $p = \text{واحدة الضغط}$ $n = \text{عدد دورات خلال وحدة الزمن}$	لحمه مطالية

المجلد 5.22 : المعادلات الميكانيكية المفيدة في عملية تصميم المدرجات /تابع/

اسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	مطابق الواحد
مثال: لوحة مسطحة Sommerfeld من أجل $D/C = 1000$	لا بعد	S	$S = 1,000,000 \times \frac{\text{lb}}{p}$ $= \frac{1,000,000 Z n}{4,136,000 \times 100 \times p}$ $\mu_4 = \text{اللزوجة المائعة} \cdot \text{lb} \cdot \text{min/in}^2$ $n = \text{rpm}$ $p = \text{lb/in}^2$ $Z = \text{اللزوجة المائعة} \cdot \text{cSt}$ $\text{For } \frac{Zn}{p} = 36,$ $S = 0.00242 \times 36 = 0.087$ <p>ملاحظة: يظهر معادلة Burnett's المعما الإجمالي المستوحى به عند $S = 0.267$ ولكن مع صيغة عالية بشكل مقبول وعامل احتكاك لسرور عند المعادلة:</p> $S = 0.080 \text{ to } S = 0.50$ <p>(See ASME Transactions 1942, p. 457.)</p>	فيها معادلة
تحت المعاد	لا بعد	S_f	$S_f = \frac{Zn}{p}$ $Z = \text{اللزوجة المائعة} \cdot \text{cP}$ $n = \text{rpm}$ $p = \text{اللزوجة المائعة} \cdot \text{lb/in}^2$	فيها معادلة

الجدول 5.22 : المعادلات الميكانيكية الفيزيائية في عملية تصميم المدرجات /تابع/

المدرجات (البيليات)

تعطى علاقة العمر النسبي مقدرةً بملايين الدورات بالعلاقة:

$$L_n = \frac{60NL_h}{1000000}$$

حيث

N = سرعة الدوران دورة/دقيقة.

L_h = عدد ساعات العمل.

كما وتعطى العمر النسبي أيضاً بالعلاقة:

$$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \text{ للمدرجات ذات الكرات.}$$

$$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \text{ للمدرجات ذات الاسطوانات الدائرية.}$$

الآن وبعد أن نحصل على الحمل المكافئ P نستطيع من هذه العلاقة إيجاد السعة C وهي التي سنستخدمها في عملية اختيار المدرج المناسب، وتسمى النسبة $\frac{C}{P}$ بنسبة التحميل.

ويعطى الحمل الستاتيكي المكافئ بالعلاقة:

$$P_o = X_o F_r + Y_o F_a$$

حيث

F_a = الحمل المحوري (القوة باتجاه المحور).

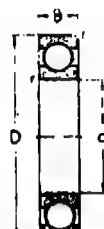
F_r = الحمل القطري (القوة باتجاه نصف القطر).

X_o, Y_o = عوامل تتعلق بنوع المدرج وعدد صفوف الكرات في المدرج (يؤخذ من المراجع الهندسية) وقيمتها من أجل المدرجات الكروية ذات الأخدود العميق

(Deep Groove Ball Bearings) $X_o = 0.6$ و $Y_o = 0.5$

وهناك عوامل أخرى تدخل في حساب السعة مثل عوامل العمر وعوامل تتعلق بنوع المدحرج وعامل يأخذ سرعة الدوران الكبيرة بعين الاعتبار، ولن نتعرض هنا لكيفية اختيار هذه العوامل إذ أنها موجودة في المراجع الهندسية إنما سننتقل إلى سرد أنواع المدحرجات:

المدرجات ذات الكرات والاختود العميق
Deep Groove Ball Bearings



سلسلة 62

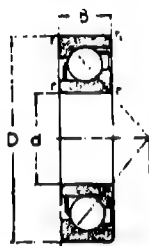
الرقم التصميمي وفق شركته (SKF)	d	D	B	r	السعة الأساسية N ديناميكية	السعة الأساسية C _r ديناميكية	السرعة المعطى المسموح بها rev/min	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
10BC02	6200	10	30	9	1	2160	3925	20000
12BC02	01	12	32	10	1	2940	5250	20000
15BC02	02	15	35	11	1	3430	5980	16000
17BC02	6203	17	40	12	1	4315	7355	16000
20BC02	04	20	47	14	1.5	6375	9805	16000
25BC02	05	25	52	15	1.5	6965	10690	13000
30BC02	6206	30	62	16	1.5	9805	14710	13000
35BC02	07	35	72	17	2	13535	19615	10000
40BC02	08	40	80	18	2	15495	22165	10000
45BC02	6209	45	85	19	2	17750	24910	8000
50BC02	10	50	90	20	2	20595	27070	8000
55BC02	11	55	100	21	2.5	25300	33340	8000
60BC02	6212	60	110	22	2.5	31580	40210	6000
65BC02	13	65	120	23	2.5	35715	42905	6000
70BC02	14	70	125	24	2.5	38440	47070	5000
75BC02	6215	75	130	25	2.5	41385	50600	5000
80BC02	16	80	140	26	3	44130	55505	5000
85BC02	17	85	150	28	3	53450	63745	4000

المحرجات الكروية ذات النوضع الذاتي
Self-Aligning Ball Bearings



السلسلة 22
والسلسلة 23

الرقم التصميمي وهو شركة (SKF)	d	D	B	r	السعة الأساسية N ديناميكية سانتيكية C ₁₀	السعة الأساسية C	السرعة الخطية المسموح بها rev/min	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
2200		10	30	14	1	1670	5540	20000
01		12	32	14	1	1960	5640	20000
02		15	35	14	1	2110	5740	16000
2203		17	40	16	1	2745	7500	16000
04	2204 K	20	47	18	1.5	3825	9610	16000
05	05 K	25	52	18	1.5	4120	9610	13000
2206	2206 K	30	62	20	1.5	5390	11770	13000
07	07 K	35	72	23	2	7845	16180	10000
08	08 K	40	80	23	2	8825	16920	10000
2209	2209 K	45	85	23	2	9810	17410	8000
10	10 K	50	90	23	2	10490	17410	8000
11	11 K	55	100	25	2.5	12455	20200	8000
2212	2212 K	60	110	28	2.5	15300	25810	6000
13	13 K	65	120	31	2.5	19610	33340	6000
14	—	70	125	31	2.5	21080	34080	5000
2215	2215 K	75	130	31	2.5	21575	34080	5000
16	16 K	80	140	33	3	24520	37850	5000
17	17 K	85	150	36	3	29030	44620	4000



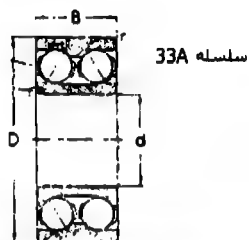
سلسلة 72B

المدحرجات ذات الكرات بنماسة زاوي وصف واحد

Single Row Angular Contact Ball Bearings

الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)		d	D	B	r		السعة الأساسية N دعامتيه		السرعة الطبيعية المسموح بها
		mm	mm	mm	mm		C _r	C	rev/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		
15BA02	7202 B	15	35	11	1	05	16	3680	13000
17BA02	03 B	17	40	12	1	08	18	4460	13000
20BA02	04 B	20	47	14	1.5	0.8	21	6370	10000
25BA02	7205 B	25	52	15	1.5	0.8	24	7700	10000
30BA02	06 B	30	62	16	1.5	08.	27	10790	10000
35BA02	07 B	35	72	17	2	1	31	14710	8000
40BA02	7208 B	40	80	18	2	1	34	18490	8000
45BA02	09 B	45	85	19	2	1	37	21180	6000
50BA02	10 B	50	90	20	2	1	39	23140	6000
55BA02	7211 B	55	100	21	2.5	1.2	43	29175	6000
60BA02	12 B	60	110	22	2.5	1.2	47	36285	5000
65BA02	13 B	65	120	23	2.5	1.2	50	42410	5000
70BA02	7214 B	70	125	24	2.5	1.2	53	44620	5000
75BA02	15 B	75	130	25	2.5	1.2	56	49030	4000
80BA02	16 B	80	140	26	3	1.5	59	55650	4000
85BA02	7217 B	85	150	28	3	1.5	64	61740	4000
90BA02	18 B	90	160	30	3	1.5	67	75760	4000
95BA02	19 B	95	170	32	3.5	2	71	85810	3000
100BA02	7220 B	100	180	34	3.5	2	76	90710	3000
105BA02	21 B	105	190	36	3.5	2	80	101500	2500
110BA02	22 B	110	220	38	3.5	2	84	112780	2500

المدرجات ذات الكرات بتماس زاوي وصفيين
Double Row Angular Contact Ball Bearings



الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d	D	B	r	السعة الأساسية N ديناميكية C _r	السعة الأساسية N ديناميكية C	السرعة العظمى المسموح بها rev/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
3302 A	15	42	19.0	1.5	9070	13730	10000
03 A	17	47	22.2	1.5	12650	18930	8000
04 A	20	52	22.2	2	13730	18930	8000
3305 A	25	62	25.4	2	19615	26085	6000
06 A	30	72	30.2	2	27165	35300	6000
07 A	35	80	34.9	2.5	35600	43640	5000
3308 A	40	90	36.5	2.5	44620	53450	5000
09 A	45	110	39.7	2.5	54430	62270	4000
10 A	50	110	44.4	3	72570	80170	4000
3311 A	55	120	49.2	3	78450	85910	4000
12 A	60	130	54.0	3.5	94630	98070	3000
13 A	65	140	58.7	3.5	108950	115720	3000
3314 A	70	150	63.5	3.5	126510	135820	3000
15 A	75	160	68.3	3.5	138080	140235	2500
16 A	80	170	86.3	3.5	153965	157890	2500
3317 A	85	180	73.0	4	173580	173580	2500
18 A	90	190	73.0	4	205940	200150	2500

المدرجات دال الأسطوانان Cylindrical Roller Bearings

الرمز القياسي وفق سيزيك (SKF)	d	D	B	T	C	r	r ₁	a	السعة الاسمية N		الدورة الخطى المسموحة rev/min
									سائبة C ₉	دائبة C	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
NU 22	سلسلة	25	52	18	1.5	1	32	11030	15790	13000	
	NU 2205	30	62	20	1.5	1	38.5	16970	23140	13000	
	2207	35	72	23	2	1	43.8	27655	35600	10000	
NU 208	2209	40	80	23	2	2	50	32750	40700	10000	
	2210	45	85	23	2	2	55	35600	43640	8000	
	2211	50	90	23	2	2	60.4	38540	45500	8000	
NU 211	2212	55	100	25	2.5	2	66.5	45500	52560	8000	
	2213	60	110	28	2.5	2.5	73.5	59820	69630	6000	
	2214	65	120	31	2.5	2.5	79.6	74040	81640	6000	
NU 214	2215	70	125	31	2.5	2.5	84.5	78450	85910	5000	
	2216	75	130	31	2.5	2.5	88.5	84720	96350	5000	
	2217	80	140	33	3	3	95.3	98070	109340	5000	
NU 217	2218	85	150	36	3	3	101.8	117680	127000	4000	
	2219	90	160	40	3	3	107	135820	140235	4000	
	2220	95	170	43	3.5	3.5	113.5	160340	173580	4000	
NU 220	2221	100	180	46	3.5	3.5	120	184855	196130	3000	
	2222	110	200	53	3.5	3.5	132.5	226435	254170	3000	
	2224	120	215	58	3.5	3.5	143.5	271645	280470	3000	
NU 226	2227	130	230	64	4	4	156	306700	296650	2500	
	2228	140	250	68	4	4	169	378540	362850	2500	
	2230	150	270	73	4	4	182	436400	423650	2500	



Taper Roller Bearings المعزرجات ذات الأسطوانات المتناحفة

الرمز المعياري وحد القياس (SKF)	d	D	B	T	C	r	r ₁	a	الحد الأقصى سائبة C ₉	الحد الأقصى صلابة C	السرعة القصوى المسموحة rev/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
32206	30	62	20	21.25	17	1.5	0.5	15	27165	31675	6000
07	35	72	23	24.25	19	2	0.8	18	36285	41430	6000
08	40	80	23	24.75	19	2	0.8	19	40210	45500	6000
32209	45	85	23	24.75	19	2	0.8	20	45500	49915	5000
10	50	90	23	24.75	19	2	0.8	21	47270	51580	5000
11	55	100	25	26.75	21	2.5	0.8	22	61050	65115	4000
32212	60	110	28	29.75	24	2.5	0.8	24	75710	78450	4000
13	65	120	31	32.75	27	2.5	0.8	26	90810	96105	4000
14	70	125	31	33.25	27	2.5	0.8	28	90810	96105	3000
32215	75	130	31	33.25	27	2.5	0.8	29	99930	101450	3000
16	80	140	33	35.25	28	3	1	30	113760	117680	3000
17	85	150	36	38.5	30	3	1	33	134840	135820	2500
32218	90	160	40	42.5	34	3	1	36	160730	158080	2500
19	95	170	43	45.5	37	3.5	1.2	38	180440	180440	2500
20	100	180	46	49	39	3.5	1.2	41	207705	207510	2500
32221	105	190	50	53	43	3.5	1.2	44	241240	236340	2000
22	110	200	53	56	46	3.5	1.2	46	271645	254000	2000
24	120	213	53	61.5	50	3.5	1.2	52	334410	298120	2000
32226	130	230	64	67.75	54	4	1.5	56	407960	369710	1600
28	140	250	68	71.75	58	4	1.5	60	481310	42670	1600
30	150	270	73	77	60	4	1.5	64	534460	480525	1600



الدولاب المعدّل

تعطى الطاقة الحركية ضمن حلقة الدولاب المعدّل:

$$E_k = \frac{W v^2}{2g}$$

حيث

W : وزن الحلقة (Kg).

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$v = \pi D n$ = السرعة الخطية عند النقطة الموافقة لنصف القطر الوسطي للحلقة.

n = عدد الدورات الوسطي /rev/s.

ويعطى التغير في الطاقة بالعلاقة:

$$E = C_E \frac{1000 P}{n}$$

E = التغير في الطاقة، J.

P = الاستطاعة، KW.

n = عدد الدورات الوسطي، /rev/s.

C_E = معدّل التقلب في الطاقة، ويعطى وفق الجدول التالي:

معدّل التقلب في الطاقة لمحركات الاحتراق الداخلي C_E^*

نوع المحرك	عدد الاسطوانات	الزاوية بين أجزاء العمود المرفقي	التقلب بالطاقة بـ %	
			رباعي الشوط	ثنائي الشوط
Single	1	-	2.35 - 2.40	0.95 - 1.00
Acting	2	180°	1.50 - 1.60	0.20 - 0.25
شاقولي	3	120°	0.60 - 0.75	0.15 - 0.18
شاقولي	4	180° and 90°	0.15 - 0.20	0.075 - 0.10
شاقولي	6	180° and 60°	0.10 - 0.12	0.016 - 0.02

* تؤخذ الحدود الدنيا في حالة المحركات العاملة تحت ضغط منخفض، بينما تؤخذ الحدود العليا للمحركات العاملة تحت ضغط عالي

وكما نعلم تتركز كتلة الدوالب المعدّل في الحلقة الخارجية، ويعطى وزنها كما يلي:

$$W = \frac{9}{10} W = \left(\frac{2\pi}{10^6} \right) k.A.\omega$$

ω = الوزن النوعي للمعدن وتساوي

$\omega = 69600 \text{ N/m}^3$ (7100 Kg/m³) لحديد الصب

$\omega = 76500 \text{ N/m}^3$ (7800 Kg/m³) للفولاذ

k = نصف القطر القطبي للحلقة، m.

A = مساحة مقطع الحلقة، mm².

حيث يعطى عرض الحلقة $B = b + (25 \text{ to } 50) \text{ mm}$ لدولاب معدّل عند استخدامه كبكرة لسيّر.

حيث

$$b = \text{عرض السيّر.}$$

وتعطى سماكة الحلقة كقيمة مقترحة كما يلي:

$$t/B = 0.5 - 1.25$$

ويعطى قطر البطيخة بالعلاقة:

$$d_h = 2 d_s$$

وطول البطيخة يقدر بالعلاقة:

$$L = 2 d_s \text{ to } 2.5 d_s$$

ويمكن إيجاد قوة الطرد المركزية على نصف الحلقة، $N (\text{Kgf})$:

$$F_c = \frac{2}{10^6} \frac{B t \omega \cdot v^2}{g}$$

ويعطى إجهاد الشد عند مقطع الحلقة المكون لقوة الطرد المركزية مع عدم أخذ وجود عوارض بعين الاعتبار.

$$\sigma_t = \frac{\omega v^2}{10^6 g} [MN/m^2]$$

ويعطى إجهاد الانحناء عند أخذ العوارض بين البطيخة والحلقة بعين الاعتبار:

$$\sigma_b = \frac{\omega v^2}{10^6 g} \times \frac{2000 \pi^2 R}{t i^2}$$

i = عدد الأذرع.

R = نصف القطر الوسطي .m

ويعطى إجهاد الشد المحصل بالعلاقة:

$$\sigma_R = 0.75 \sigma_i + 0.25 \sigma_b$$

وتعطى القوة اللازمة لإيقاف الدولاب المعدل بالعلاقة:

$$F_r = \frac{W_r \cdot a}{g}$$

E_r = القوة اللازمة للإيقاف، [N].

W_r = وزن الحلقة، N (Kg f).

a = التباطؤ، m/s².

6

معادلات تشغيل المعادن

سرعة القطع

تعتبر سرعة القطع أهم حسابات أدوات القطع، وتعطى سرعة القطع عندما تعطى سرعة الدوران بالدورة في الدقيقة (rpm) وبعد معرفة القطر بالعلاقة:

$$CS = \frac{(D\pi)(rpm)}{12}$$

حيث

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

D = القطر، in (mm).

$$3.1416 = \pi$$

rpm = سرعة الدوران، rpm.

ونستطيع استخدام علاقة أبسط وتطبيقها في الحالات العملية وتعطى أجوبة معقولة وهي:

$$CS = \frac{(D)(rpm)}{4}$$

ولإيجاد سرعة الدوران مع معرفة سرعة القطع والقطر نستخدم العلاقة:

$$rpm = \frac{4CS}{D}$$

سرعة تغذية أداة القطع

تعطى سرعة تقدم أداة الخراطة، الثقب، أداة حفر، موسّع ثقب، ... الخ. وبعد معرفة طول القطع والزمن المستغرق لعملية القطع وسرعة الدوران بالعلاقة:

$$F = \frac{L}{(rpm)(T)}$$

حيث

F = التغذية، (mm/rev) .in/rev

L = طول القطع، (mm) .in

T = الزمن، min

المحاور المخروطية

تستخدم العلاقة التالية لحساب طول المحور المخروطي أو مقدار الانخفاض في القطر لوحدة الطول من المحور:

$$L = \frac{12(D_1 - D_2)}{T}$$

حيث

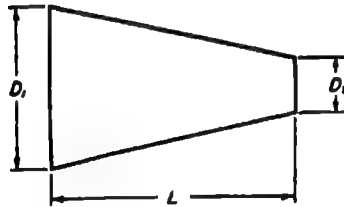
L = طول المخروط.

D_1 = القطر الكبير.

D_2 = القطر الصغير.

T = مقدار الانخفاض في القطر لوحدة الطول (m) .foot

ويظهر الشكل التالي أبعاد المحور المخروطي:



الشكل 6.1

آلات التفريز

يجب أن يتوافق مقدار تغذية أو تقدم الطاولة في آلات التفريز مع سرعة دوران أداة القطع (rpm) ومقدار التقدم لكل سن لكل دورة من دورات أداة القطع.

تغذية الطاولة = (التقدم لكل سن) (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm).

ولمعرفة مقدار الانتقال الكلي لطاولة التفريز لإجراء عمليات التفريز من الضروري معرفة طول الاقتراب أو الاقتحام.

ويعطى طول الاقتراب من سطح القطع بالعلاقة:

$$approach = \frac{D - \sqrt{D^2 - F^2}}{2}$$

الاقتحام أو الاقتراب

حيث

approach = مقدار الاقتراب أو الاقتحام، in (mm).

D = قطر أداة القطع.

F = وجه القطع.

ويعطى مقدار التغذية لكل سن من أسنان سكين التفريز بالعلاقة:

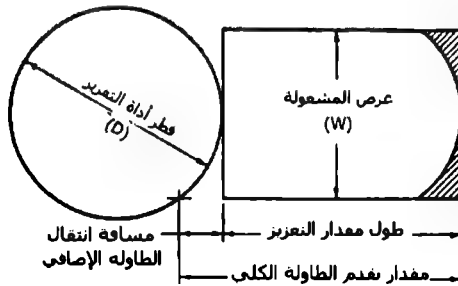
$$\frac{\text{مقدار تغذية الطاولة}}{\text{(rpm) (عدد الأسنان)}} = \text{التغذية لكل سن}$$

يجب أن نعطي زمناً للآلة إضافياً لتفريز الوجه. وعند انتقال سكين التفريز على طول الوجه فإنه سيبقى جزء من الوجه المراد تفريزه غير مفرّز، وهذا ما عبرنا عنه بالمساحة المهشّرة من الشكل 6.2، ولإكمال تفريز كامل الوجه يجب أن نزيد مسافة الانتقال لطاولة التفريز. ويجب حساب هذه المسافة المضافة وإعطاء زمن مناسب لإنجاز هذه المسافة الزائدة، وتحسب هذه المسافة بالمعادلة:

$$\text{مسافة انتقال الطاولة الإضافية} = 1/2(D - \sqrt{D^2 - W^2})$$

هناك ثلاث معادلات تستخدم في حسابات آلات التفريز وهاك أولاها:

$$CS = \frac{(D)(rpm)}{4}$$



الشكل 6.2: مقدار اقتراب أداة القطع

حيث

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

rpm = سرعة الدوران، rpm.

D = قطر أداة القطع، in (mm).

والمعادلة الثانية هي:

$$rpm = \frac{4CS}{D}$$

بينما المعادلة الثالثة تعطى بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{(\text{عدد الأسنان}) (\text{التغذية لكل سن}) (rpm)}$$

مقدار تقدم سكينه التفريز

تتجاوز حركة طاولة التفريز في معظم عمليات التفريز طول المنطقة المراد تفريزها الموضحة على الرسم الجزئية للقطعة، ويبين الشكل 6.3 مقدار تقدم سكينه التفريز ويعطى وفق المعادلة:

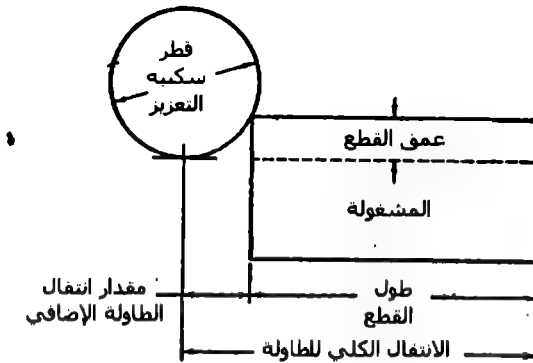
$$\text{التقدم} = \sqrt{Dd - d^2}$$

حيث

D = قطر سكينه التفريز، in (mm).

d = عمق القطع، in (mm).

تعتبر هذه المعادلة صحيحة فقط إذا كان عمق القطع أقل من نصف قطر سكينه التفريز، وعندما يكون عمق القطع مساوياً أو أكبر من نصف قطر سكينه التفريز فإن التقدم سيكون دوماً مساوياً لنصف قطر سكينه التفريز.



الشكل 6.3: تقدم سكينه التفريز

عمق التفريز المطلوب لمكان توضع الخابور

يعطى عمق التفريز المطلوب لتهيئة مكان الخابور بالعلاقة:

$$D = \frac{T}{2} + A$$

$$A = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2}$$

حيث

D = عمق القطع، in (mm).

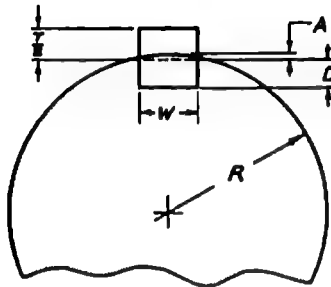
T = سماكة الخابور.

W = عرض الخابور.

A = ارتفاع القوس المحدد بعرض الخابور.

R = نصف قطر المحور.

وفيما يلي شكل يبين هذه الأبعاد:



الشكل 6.4: أبعاد الخابور ومكان توضع الخابور

زمن الإنتاج (التشغيل)

تعطى معادلة حساب الزمن الحقيقي لإنتاج قطعة واحدة من أجل مجموعة تحوي بحجوم قطعاً مختلفة بالعلاقة:

$$T = \frac{SU}{N} + U$$

حيث

T = الزمن الحقيقي لإنتاج الوحدة، min.

SU = زمن التحضير، min.

N = عدد القطع في المجموعة.

U = الزمن القياسي للوحدة، min.

طريقة الإنتاج المثلى

عندما تتوفر أكثر من طريقة لإنتاج جزء مكون من قطعة أو عدة قطع، فإنه يمكن إيجاد عدد القطع من ذلك الجزء والناجم عن تغيير طريقة الإنتاج بالعلاقة:

$$N = \frac{SU_2 - SU_1}{T_1 - T_2}$$

حيث

N = عدد القطع التي نستطيع ربحها باعتماد طريقة معينة.

SU_1 = زمن تحضير الطريقة الأولى.

SU_2 = زمن تحضير الطريقة الثانية.

T_1 = زمن إنتاج الوحدة بالطريقة الأولى.

T_2 = زمن إنتاج الوحدة بالطريقة الثانية.

حجم المجموعة الأصغري

تعتمد معادلة تحديد حجم المجموعة الأصغري على زمن التحضير وعلى الزمن القياسي لإنتاج وحدة كما يلي:

$$N = \frac{SU}{TK}$$

حيث

N = حجم المجموعة الأصغري.

SU = زمن التحضير.

T = الزمن القياسي لإنتاج وحدة.

K = نسبة عظمى تختار بشكل كيمي.

زمن الخراطة

يتأثر زمن الخراطة من قطر لآخر بعدة عوامل، حيث يتأثر الزمن بكل من قطر المشغولة ونوع المادة وسرعة محور الدوران وسرعة التغذية وعمق القطع. وإذا كانت سرعة محور الدوران (أو سرعة القطع) بنصف ما هو مفروض فإن زمن تشغيل القطعة سيتضاعف مرتين، وكذلك الأمر بالنسبة لمقدار التغذية، فإذا كان كل من التغذية والسرعة كلاهما بنصف ما هو مفروض فإن الزمن اللازم سيستغرق أربعة أضعاف:

$$\frac{\text{طول القطع}}{\text{الزمن}} = \text{(التغذية) (سرعة الدوران rpm)}$$

الزمن المطلوب لتبديل أدوات القطع

تعطى معادلة الزمن اللازم لتبديل أدوات القطع بالعلاقة:

$$UT = \frac{(TT)(CT)}{L}$$

حيث

UT = الزمن القياسي لتبديل الأداة المثلمة بالأداة الحادة.

TT = الزمن الكلي لتبديل الأدوات.

CT = زمن القطع الذي تؤديه الأداة أثناء عملية التشغيل.

L = عمر الأداة.

زمن إجراء الشدف (الشنفرة)

تعطى المعادلة التي تحسب الزمن المستغرق في عملية الشنفرة بالشكل:

$$\frac{\text{طول القطع}}{\text{زمن الشنفرة}} = \text{(التغذية) (سرعة الدوران rpm)}$$

زمن خراطة الوجه

يعطى الزمن اللازم لخراطة وجه المشغولة على المخرطة بالعلاقة:

$$\text{زمن خراطة الوجه} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية) (سرعة الدوران rpm)}}$$

أبعاد اللولب المطلوبة عند تشغيل اللولب

يعتبر عمق السن عنصراً هاماً ومؤثراً على عملية تقدير الزمن اللازم لتشغيل القلاووظ، وعلى الاستطاعة المنقولة (KW)، وعلى نسبة الإنتاج وعلى متغيرات هامة أخرى. ويحسب عمق السن لأنواع البراغي المختلفة بالعلاقات التالية:

1. سن V وفق أمريكي نظامي:

$$d = \frac{0.6495}{N}$$

حيث d = عمق السن، in (m).

N = عدد الأسنان لكل إنش (عدد الأسنان لكل ميليمتر).

2. سن أكم برغي Acme:

$$d = \frac{0.500}{N} + 0.010 \text{ in}$$

3. السن المربع (انظر الشكل 6.5):

$$d = \frac{0.500}{N}$$

4. سن دودي 20° (الشكل 6.5):

$$d = \frac{0.6866}{N}$$

5. سن Buttress:

$$d = \frac{0.750}{N}$$

ويحسب العمق الكلي للمسنن (ويعبر عادة عن العمق الكلي للمسنن) بالعلاقات التالية:

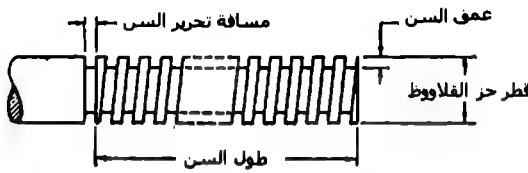
1. المسنن المستقيم القياسي:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

حيث

D = العمق الكلي للمسنن.

P = الخطوة القطرية.



الشكل 6.5 : عناصر القلاووظ المربع أو acme أو الدودي.

2. المسنن المائل:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

3. للمسكن المائل المخروطي:

$$D = \frac{1.888}{P}$$

4. للمسكن الدودي:

$$D = 0.6866P$$

حيث P = الخطوة الخطية.

5. للمسكن المخروطي:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

حيث P = الخطوة القطرية العمودية.

عمليات تشغيل القلاووظ

تعطى معادلة زمن تشغيل القلاووظ بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{(\text{طول القطع}) (\text{سن لكل إنش})}{\text{سرعة الدوران rpm}}$$

(وبنظام اللوالب العالمية يؤخذ عدد الأسنان في كل ميليمتر).

كما ويعطى زمن تشغيل وإنتاج أسنان لوالب دودية أو مربعة أو acme بالعلاقة:

$$T = \frac{LDdn}{4(fpm)(f)}$$

حيث

T = الزمن اللازم لتشغيل القلاووظ، min.

L = طول القلاووظ، in (mm).

D = القطر الرئيسي للقلاووظ.

d = عمق السن.

n = عدد الأسنان في كل إنش (مليمتر).

fpm = سرعة القطع، ft/min.

f = عمق القطع لكل شوط.

الزمن اللازم للقلوطة بذكور القلاووظ

يعطى الزمن اللازم لقلوطة الأسنان ضمن القطعة بالعلاقة:

$$T = \frac{ND\pi}{8(fpm)}$$

حيث

T = الزمن بالدقائق لقلوطة 1.0 إنش (25.4 mm) ضمن الصامولة أو إخراجها بنفس المسافة.

N = عدد الأسنان لكل إنش (مليمتر).

D = قطر ذكر القلاووظ in (mm).

$$\pi = 3.1416$$

fpm = سرعة القطع، ft/min (m/min).

الزمن اللازم لإجراء التفريز الجانبي

يعطى الزمن اللازم لإجراء التفريز الجانبي للقطعة بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية لكل سن) (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm)}}$$

يمكن أن يحدد طول القطع إما بالإنش أو بالميليمتر.

الزمن اللازم لتبديل أداة القطع للمقشطة

تعطى وحدة الزمن اللازمة لتبديل أداة القطع للمقشطة بالعلاقة:

$$\text{وحدة الزمن} = \frac{\text{(الزمن اللازم لتبديل أداة القطع) (زمن التفريز لكل قطعة)}}{\text{عمر الأداة}}$$

سرعة القطع للمقشطة

توجد هناك معادلتان تفيضان في حساب سرعة القطع عندما نعلم عدد الأشواط بالدقيقة وطول كل شوط، أو نستطيع حساب عدد الأشواط بالدقيقة إذا علمنا سرعة القطع وطول الشوط.

$$CS = \frac{NL}{6}$$

$$N = \frac{6(CS)}{L}$$

حيث

N = عدد الأشواط بالدقيقة للذراع الحامل للأداة.

L = طول الشوط.

CS = سرعة القطع، (ft/min) (m/min).

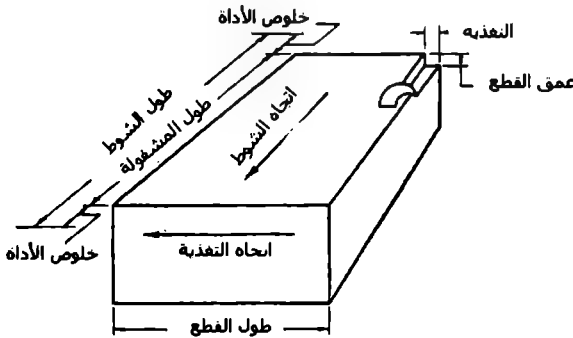
زمن القطع على المشطة

يعطى الزمن اللازم لقطع القطعة على المكنة بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{عدد الأشواط بالدقيقة}}$$

(عدد الأشواط بالدقيقة)

نستطيع استخدام هذه المعادلة أيضاً لحساب زمن التسوية:



الشكل 6.6 : عناصر عمل المشطة

معدل التغذية للمجلفنة المركزية

يُعطى معدل التغذية للمشغولة:

$$F = \pi d N \sin \alpha$$

F = تغذية المشغولة، in/min (mm/min).

d = قطر الدولاب المعدل (المنظم)، in (mm).

N = سرعة دوران الدولاب المنظم، rpm.

α = زاوية ميل الدولاب المنظم.

زمن التجليط

تعطي المعادلات التالية قيماً تقريبية لزمن التجليط لمتوسط عمل منجز في ورشة.
من أجل التجليط الخشن:

$$T = \frac{LT_s D}{(w/2)F(4CS)}$$

أو

$$T = \frac{LT_s D}{2wF(CS)}$$

من أجل تجليط نهائي (تجليط إنهاء):

$$T = \frac{LT_s D}{wF(CS)}$$

حيث

T = الزمن، min.

L = طول المشغولة.

T_s = الكمية الكلية للمادة المزالة.

D = قطر المشغولة.

w = عرض وجه دولاب الجليخ.

F = التغذية أو عمق القطع.

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

وجود الثابت 1/2 في معادلة التجليخ الخشن تعني أن التغذية الطولية ستكون بنصف وجه الدولاب لكل دورة للعمل. وتعطي النسبة T/F عدد مرات القطع اللازمة لإزالة الكمية المزالة بكاملها، وتعتبر D/4CS هي مقلوب 4CS/D في معادلة الدوران.

زمن تفريز القلاووظ

يعطى زمن التفريز بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{التغذية لكل سن (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm)}}$$

الزمن اللازم للبشر

تعطى بشكل عام المعادلة التي تحسب الزمن اللازم للبشر:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول الشوط}}{\text{سرعة القطع}} + \frac{\text{طول الشوط}}{\text{سرعة العودة}}$$

سرعة المشغولة وسرعة أداة قطع المسننات (التسنين)

تعطى معادلتني سرعة المشغولة وسرعة أداة قطع المسننات (مقطع):

$$HR = (WR) (N)$$

أو

$$WR = \frac{HR}{N}$$

حيث

WR = عدد دورات المحور الحامل للمشغولة، rpm.

HR = سرعة دوران حامل أداة القطع، rpm.

N = عدد أسنان المسنن أو عدد الأحاديث.

الزمن اللازم لتشغيل مسنن مستقيم

تعطى المعادلة التي تقدر زمن التشغيل (تفريز) مسنن مستقيم بالعلاقة:

$$T = \frac{N(L + A)}{F(rpm)}$$

حيث

T = زمن القطع، min.

N = عدد أسنان المسنن التي ستشكل.

L = وجه المسنن أو طول السن.

A = اقتراب حامل أداة القطع (المسافة التي سيتقدمها حامل أداة القطع حتى يصل إلى كامل عمق القطع).

F = تغذية حامل أداة القطع (دورة لحامل الأداة/mm) دورة لحامل الأداة/in.

rpm = سرعة دوران حامل أداة القطع، rpm.

يمكن تحديد عدد الأسنان التي ستشكل وطول وجه المسنن من المخططات والرسوم التصميمية، كما ويتم حساب تقدم أداة القطع، بينما يتم إيجاد اقتراب حامل الأداة وسرعة دوران الحامل من جداول التوصيات أو الجداول الموصى بها.

ويحسب مقدار اقتراب حامل الأداة من المشغولة وفق المعادلة:

$$A = \sqrt{d(D - d)}$$

حيث

A = مقدار الاقتراب، in (mm).

D = قطر حامل الأداة، in (mm).

d = العمق الكلي لسن المسنن، in (mm).

زمن تأثر (تخديد المحاور)

يُحسب زمن إجراء (تخديد) لمحور عبر طريقة حامل الأداة بالعلاقة:

$$T = \frac{N(L + A)}{KF(rpm)}$$

حيث

T = الزمن، min.

N = عدد الأخاديد.

L = طول الأخاديد.

A = الاقتراب، in (mm).

K = التغذية لكل أخدود، in (mm).

F = عدد الأنجاديد على أداة التخديد.

rpm = سرعة دوران الحامل لأداة التخديد، rpm.

الزمن اللازم للنشر بمنشار المعادن

طول القطع

زمن النشر =

(عدد الأشواط بالدقيقة) (التغذية لكل شوط)

الزمن اللازم للنشر بمنشار شريطي (شئلة)

طول القطع, in(mm)

زمن النشر =

[سرعة القطع, ft/min(m/min) (خطوة المنشار) (التغذية

لكل سن)

خطوة المنشار = عدد الأسنان لكل إنش (مليمتر).

استطاعة المحرك المطلوبة لإنجاز عمليات القطع بالخراطة

لقد أعطت شركة Carboloy المعادلة التالية:

استطاعة المحرك hp	الآلة A
(تشغيل) قطع B	
حساب الاستطاعة المطلوبة لكل أداة، باستخدام المعادلة المعطاة أدناه	تقدر الاستطاعة اللازمة للتغلب على الاحتكاك داخل الآلة بحوالي 30 % من B
أدوات تقوم بالقطع بأن واحد hp	
- (DFSC) الأداة الأولى	
- (DFSC) الأداة الثانية	
- .. الخ	
- الاستطاعة الكلية المطلوبة لأدوات	
القطع B	

الجدول 6.1 ثوابت الاستطاعة لمعادن مختلفة

المادة	ثابت الاستطاعة	المادة	ثابت الاستطاعة
Magnesium alloy	3	Cast iron, medium	4
Aluminum castings	3	Cast iron, soft	3
Aluminum bar stock	4	Copper	4
Brass, hard	10	SAE X1112	3
Brass, soft	4	SAE X4130	4
Bronze, soft	10	Stainless steel	4
Bronze, soft	4	Monel metal	5
Cast iron, hard	5		

لقد استخدمت المعادلة التالية لإنجاز الحسابات السابقة:

$$hp = DFSC$$

حيث

D = عمق القطع، in (mm).

F = التغذية، in (mm).

S = سرعة السطح، ft/min (m/min).

C = ثابت الاستطاعة يؤخذ من الجدول السابق.

لاحظ أن: $hp \times 0.746 = KW$.

7

معادلات التدفئة والتهوية والتكييف

معادلات التكيف

قوانين المروحة

يقاس تدفق الهواء لمروحة مركزية بالقدم المكعب بالدقيقة (cubic feet per minute (CFM)) (m^3/min)، ويتغير تبعاً لسرعة دوران دولاب المروحة (RPM) كما يلي:

$$\frac{CFM_2}{CFM_1} = \frac{RPM_2}{RPM_1}$$

ويتعلق الضغط الستاتيكي SP والمقاس بعمود (mm) in من الماء بتدفق الهواء مقاساً بـ (CFM) أو RPM وبالتالي:

$$\frac{SP_2}{SP_1} = \left(\frac{CFM_2}{CFM_1} \right)^2 = \left(\frac{RPM_2}{RPM_1} \right)^2$$

كما وتنتقل استطاعة الدخل للمروحة (معبراً عنها باستطاعة الكبج (brake horsepower bhp (KW) بتدفق الهواء و RPM والضغط الستاتيكي وذلك لكي تؤمن التدفق المطلوب، وبالتالي:

$$\frac{BHP_2}{BHP_1} = \left(\frac{CFM_2}{CFM_1} \right)^3 = \left(\frac{RPM_2}{RPM_1} \right)^3 = \left(\frac{SP_2}{SP_1} \right)^{1.5}$$

ونحتاج استطاعة الكبج الداخلة للمروحة إلى إدخال مردود المروحة بعين الاعتبار لكي تتمكن من تأمين التدفق المطلوب، ويقدر مردود المروحة FAN_{eff} بحوالي % (65 - 85)، وتصبح علاقة استطاعة الكبج كما يلي:

$$BHP = \frac{CFM \times SP \times SP.GR.}{6356 \times FAN_{eff}}$$

كما وتقاد المروحة بمحرك كهربائي M/D الذي يملك بدوره مردوداً يتراوح بين % (80 - 95) M/D_{eff} ، وبالتالي نستطيع كتابة استطاعة المحرك وفق العلاقة:

$$MHP = \frac{BHP}{M / D_{eff}}$$

يعتبر حجم المروحة (أي قطر دولاها) ثابتاً في هذه المعادلة، طالما أننا نعتبر أن كثافة الهواء ثابتة خلال عمل المروحة، كما يعتبر الوزن النوعي للهواء المنقول (specific gravity) SP.GR له القيمة = 1.0.

معادلات تغيير الهواء

تعطى نسبة تغيير الهواء بالساعة (AC/HR) لتدفق هواء $CFM \text{ ft}^3/\text{min}$ (m^3/min) ولغرفة بحجم $VOLUME \text{ ft}^3$ (m^3) بالعلاقة:

$$\frac{AC}{HR} = \frac{CFM \times 60}{VOLUME}$$

أو إذا علمنا معدل تغيير الهواء بالساعة لحيز عبارة عن حجم ثابت عندها يعطى تدفق الهواء المطلوب بالعلاقة:

$$CFM = \frac{AC / HR \times VOLUME}{60}$$

معادلات تدفق الهواء

يرتبط الضغط الكلي TP ضمن قناة التهوية مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء مع الضغط الستاتيكي SP أيضاً مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء، والضغط الناتج عن السرعة VP مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء بالعلاقة:

$$TP = SP + VP$$

إذ يعطى الضغط الناتج عن السرعة أو ضغط السرعة Velocity pressure VP،
بالإنش (mm) عمود ماء مع سرعة الهواء V ft/min بالعلاقة:

$$VP = \left(\frac{V}{4005} \right)^2 = \frac{V^2}{4005^2}$$

لاحظ بأن: إنش ماء $\times 25.4$ = ميليمتر عمود ماء.

كما وتعطى سرعة الهواء V, ft/min ضمن قناة التهوية بمعدل تدفق Q ft³/min
خلال قناة مساحة مقطعها A ft² بالعلاقة:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q \times 144}{W \times H}$$

لاحظ أيضاً:

$$\text{ft/min} \times 0.3048 = \text{m/min}$$

الآن لمعرفة القطر المكافئ D_{EQ} لقناة قهوية دائرية المقطع مكافئة لقناة بمقطع مستطيل
عرضه A وارتفاعه B تستطيع تطبيق العلاقة:

$$D_{EQ} = \frac{1.3(AB)^{0.625}}{(A+B)^{0.25}}$$

معادلات التسخين والتبريد بالهواء

تعطى كمية الحرارة المحسوسة H_s لجريان هواء بتدفق CFM وفرق درجات حرارة
 ΔT °F بالعلاقة:

$$H_s = 1.08 \times \text{CFM} \times \Delta T$$

كما تعطى كمية الحرارة الكامنة لنفس الجريان H_L بوجود فرق بنسبة الرطوبة
 ΔW_{GR} (ماء lb/هواء جاف gr) بالعلاقة:

$$H_L = 0.68 \times \text{CFM} \times \Delta W_{GR}$$

وعندما تعطى نسبة الرطوبة بالباوند من الماء لكل باوند من الهواء الجاف، عندها تعطى الحرارة الكامنة بالعلاقة:

$$H_L = 4840 \times \text{CFM} \times \Delta W_{LB}$$

وتعطى كمية الحرارة الكلية H_T لفرق في الإنثالبي Δh ، هواء جاف Btu/lb، بالعلاقة:

$$H_T = 4.5 \times \text{CFM} \times \Delta h$$

كما نستطيع إيجاد الحرارة الكلية أيضاً عبر جمع الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة كما يلي:

$$H_T = H_S + H_L$$

وبالتالي تصبح نسبة الحرارة المحسوسة SHR كما يلي:

$$SHR = \frac{H_S}{H_T} = \frac{H_S}{H_S + H_L}$$

عندما يمزج تدفق هواء خارجي CFM_{OA} مع الهواء العائد من الغرفة CFM_{RA} ويكونان هواء التزويد CFM_{SA} ، عندها تعطى درجة حرارة الهواء الممزوج T_{MA} بالعلاقة:

$$T_{MA} = \left(T_{ROOM} \times \frac{\text{CFM}_{RA}}{\text{CFM}_{SA}} \right) + \left(T_{OA} \times \frac{\text{CFM}_{OA}}{\text{CFM}_{SA}} \right)$$

حيث

T_{ROOM} = درجة الحرارة التصميمية للغرفة.

T_{OA} = درجة حرارة الهواء الخارجي، وتعطى أيضاً درجة حرارة الهواء الممزوج بالعلاقة:

$$T_{MA} = \left(T_{RA} \times \frac{CFM_{RA}}{CFM_{SA}} \right) + \left(T_{OA} \times \frac{CFM_{OA}}{CFM_{SA}} \right)$$

نواتج التكثيف المتشكلة في مكيفات الهواء

تعطى نسبة تشكّل نواتج التكثيف في مكيفات الهواء، ويرمز لها GPM_{ACCOND} ، لتدفق هواء CFM (ft^3/min) لحجم معين من الهواء (هواء جاف SV (ft^3/lb))، ولتغيير محدد ΔW_{LB} ، (هواء الجاف lb ماء lb) بالعلاقة التالية:

$$GPM_{ACCOND} = \frac{CFM \times \Delta W_{lb}}{SV \times 8.33}$$

ولرطوبة محددة ΔW_{GR} ، (هواء جاف lb ماء gr) تصبح كما يلي:

$$GPM_{ACCOND} = \frac{CFM \times \Delta W_{GR}}{SV \times 8.33 \times 7000}$$

ويعطى تدفق البخار المطلوب، lb/h ، وكمية الحرارة الكامنة H_{FG} للتبخير، Btu/lb ، عند الضغط التصميمي للمنشأة بالعلاقة:

$$\frac{LBSTM}{HR} = \frac{BTU/HR}{H_{FG}}$$

أخيراً، تعطى كمية الحرارة المنقولة الإجمالية H ، Btu/h ، خلال مساحة A ، ft^2 ، ولفرق درجة حرارة ΔT ، $^{\circ}F$ ، بالعلاقة:

$$H = U \times A \times \Delta T$$

معادلات توازن الهواء المطلوب

يعطى تدفق هواء التزويد SA مقدراً بالقدم المكعب بالدقيقة بدلالة الهواء المعاد RA والهواء الخارجي OA والهواء المطروح EA والهواء المبدّل RFA بالعلاقة:

$$SA = RA + OA = RA + EA + RFA$$

عندما يتفوق تدفق الهواء الخارجي المتص OA على الهواء المطروح EA، عندها يعطى تدفق الهواء الخارجي بالعلاقة:

$$OA = EA + RFA$$

أما عندما يتفوق تدفق الهواء المطروح EA على الهواء الخارجي الأصغري المتص OA، عندها يعطى تدفق الهواء الخارجي بالعلاقة:

$$OA = EA \quad RFA = 0$$

أما إذا أخذت الدورة الاقتصادية بالحسبان أثناء التصميم فعندها:

$$OA = SA = EA + RFA \quad RA = 0$$

معادلات ترطيب الغرفة

تعرّف الحبيبات أو قطرات الرطوبة المطلوبة لتحقيق ترطيب الغرفة بالفرق بين قطرات الماء لكل قدم مكعب من هواء الغرفة (برطوبة محددة لـ W قطرات لكل باوند من الهواء الجاف ولحجم نوعي من الهواء SV، هواء جاف ft^3/lb) ولثلاثهما هواء التزويد، أو:

$$GRAINS_{REQ'D} = \left(\frac{W_{GR}}{SV} \right)_{ROOM AIR} - \left(\frac{W_{GR}}{SV} \right)_{SUPPLY AIR}$$

وتعطى كمية الرطوبة بالباوند المطلوبة لتحقيق الترطيب، وذلك عندما يعبر عن الرطوبة النوعية بالباوند من الماء لكل باوند هواء جاف، بالعلاقة:

$$POUNDS_{REQ'D} = \left(\frac{W_{LB}}{SV} \right)_{ROOM AIR} - \left(\frac{W_{LB}}{SV} \right)_{SUPPLY AIR}$$

كما يعطى تدفق البخار المطلوب بالباوند في الساعة لإنتاج الرطوبة المطلوبة بالعلاقة:

$$\begin{aligned} \text{LB STM/HR} &= \frac{\text{CFM} \times \text{GRAINS}_{\text{REQ'D}} \times 60}{7000} \\ &= \text{CFM} \times \text{POUNDS}_{\text{REQ'D}} \times 60 \end{aligned}$$

ولتحديد ربح المرطب من كمية الحرارة المحسوسة H_s ، Btu/h ، لتدفق بخار Q ، lb/h ، وفرق درجات الحرارة T بين حرارة البخار وحرارة هواء التزويد، والمرطب ذو طول قناة الدخول L ، ft ، استخدم العلاقة:

$$H_s = 0.244 \times Q \times \Delta T + L \times 380$$

تحديد درجة حرارة تكاثف قطرات البخار على زجاج النوافذ

ستكاثف الرطوبة الموجودة في الهواء على زجاج النوافذ عندما تكون درجة حرارة الزجاج T_{GLASS} أقل من درجة حرارة نقطة الندى DP_{ROOM} لهواء الغرفة أو:

$$T_{\text{GLASS}} = T_{\text{ROOM}} - \left[\frac{R_{\text{IA}}}{R_{\text{GLASS}}} \times (T_{\text{ROOM}} - T_{\text{OA}}) \right]$$

حيث

T = درجة الحرارة، $^{\circ}\text{F}$.

R = قيمة R ، $\text{h.ft}^2.^{\circ}\text{F/Btu}$.

U = قيمة U ، $\text{Btu}/(\text{h.ft}^2.^{\circ}\text{F})$.

IA = فيلم (طبقة) الهواء الداخلي.

OA = درجة حرارة الهواء الخارجي التصميمية.

DP = نقطة الندى.

وعندما تستخدم U الإجمالية للزجاج:

$$T_{GLASS} = T_{ROOM} - \left[\frac{U_{GLASS}}{U_{IA}} \times (T_{ROOM} - T_{OA}) \right]$$

وسيححدث التكاثف إذا كان $T_{GLASS} < DP_{ROOM}$.

معادلات خصائص الهواء في مكيفات الهواء

تعطى الرطوبة النوعية W للهواء المستخدم في مكيفات الهواء، هواء جاف lb/ماء lb، بالعلاقات:

$$W = 0.622 \times \frac{P_W}{P - P_W}$$

$$W = \frac{(2501 - 2.381T_{WB})(W_{SATWB}) - (T_{DS} - T_{WB})}{2501 + 1.805T_{DB} - 4.186T_{WB}}$$

$$W = \frac{(1093 - 0.556T_{WB})(W_{SATWB}) - 0.240(T_{DB} - T_{WB})}{1093 + 0.444T_{DB} - T_{WB}}$$

حيث:

W = الرطوبة النوعية: lb H₂O/lb DA أو gr H₂O/lb DA.

W_{ACTUAL} = الرطوبة الفعلية، lb H₂O/lb DA أو gr H₂O/lb DA.

W_{SAT} = رطوبة الإشباع النوعية عند استخدام مقياس الحرارة الجاف (ذو بصيلة جافة).

W_{SATWB} = رطوبة الإشباع النوعية عند استخدام مقياس الحرارة الرطب (ذو بصيلة رطبة).

P_W = الضغط الجزئي لبخار الماء، lb/ft².

P = الضغط المطلق الكلي لمزيج الهواء وبخار الماء، lb/ft².

P_{SAT} = ضغط الإشباع الجزئي لبخار الماء عند استخدام مقياس الحرارة الجاف، lb/ft.

RH = الرطوبة النسبية، %.

H_S = كمية الحرارة المحسوسة، Btu/h.

H_L = كمية الحرارة الكامنة، Btu/h.

H_T = الحرارة الكلية، Btu/h.

m = التدفق الكتلي، للهواء الجاف أو الماء lb/h.

cp = الحرارة النوعية (للhواء 0.24 Btu/lb DA، وللماء 1.0 Btu/lb H₂O).

T_{DB} = درجة الحرارة باستخدام مقياس الحرارة الجاف، °F.

T_{WB} = درجة الحرارة باستخدام مقياس الحرارة الرطب، °F.

ΔT = فرق درجات الحرارة، °F.

ΔW = فرق الرطوبة النوعية، lb H₂O/lb DA أو gr H₂O/lb DA.

Δh = فرق الإنثالبي، Btu/lbDA.

L_v = الحرارة الكامنة للتبخير، Btu/LB H₂O.

تعطى الرطوبة النسبية RH للهواء بالعلاقتين:

$$RH = \frac{W_{ACTUAL}}{W_{SAT}} \times 100\%$$

$$RH = \frac{P_W}{P_{SAT}} \times 100\%$$

وتحسب كمية الحرارة المحسوسة والكامنة والكلية وفق المعادلات:

$$H_S = mc_p \times \Delta T$$

$$H_L = L_v m \times \Delta W$$

$$H_T = m \times \Delta h$$

معادلات نظام مبرّد الماء

تعطى كمية الحرارة الكلية H المزالة بنظام مبرّد الماء في نظام التكييف بالهواء بالعلاقة:

$$H = 500 \times \text{GPM} \times \Delta T$$

كما يعطى معدّل التدفق في مبخر الماء GPM_{EVAP} بالعلاقة:

$$\text{GPM}_{\text{EBAP}} = \frac{\text{TONS} \times 24}{\Delta T}$$

بينما يعطى معدّل التدفق في المكثف GPM_{COND} بالعلاقة:

$$\text{GPM}_{\text{COND}} = \frac{\text{TONS} \times 30}{\Delta T}$$

حيث

H = كمية الحرارة الكلية، Btu/h.

GPM = معدّل تدفق الماء، gal/min.

ΔT = فرق درجات الحرارة، °F.

TONS = حمل التكييف، tons.

GPM_{EVAP} = معدّل تدفق الماء في المبخر، gal/min.

GPM_{COND} = معدّل تدفق الماء في المكثف، gal/min.

معادلات برج التبريد

تعتبر درجتا حرارة الاقتراب لبرج التبريد $APPROACH_{CTS}$ وللمبادل الحراري $APPROACH_{HES}$ قيمتان هامتان لحساب أداء برج التبريد والمبادل الحراري، وتعطى درجات الحرارة هذه بالعلاقات:

$$APPROACH_{CTS} = LWT - AWB$$

$$APPROACH_{HES} = EWT_{HS} - LWT_{CS}$$

$$RANGE = EWT - LWT$$

حيث

EWT = درجة حرارة الماء الداخل (°F).

LWT = درجة حرارة الماء الخارج (°F).

AWB = درجة حرارة المحيط بمقياس الحرارة الرطب (تصميم WB ، °F).

HS = الطرف الساخن.

CS = الطرف البارد.

ومن أجل برج التبريد نفسه يمكننا كتابة:

$$C = \frac{E + D + B}{D + B}$$

$$B = \frac{E - (C - 1)D}{C - 1}$$

$$E = GPM_{COND} \times R \times 0.0008$$

$$D = GPM_{COND} \times 0.0002$$

$$R = EWT - LWT$$

B = تدفق ماء الدسع، gal/min.

C = دارات التجميع.

D = الانجراف، gal/min.

E = التبخر، gal/min.

EWT = درجة حرارة الماء الداخلى، °F.

LWT = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

R = مجال درجات الحرارة، °F.

معادلات نظام التسخين

ضياعات الضغط في أنابيب البخار

لنعتبر أن التدفق ثابت في الأنبوب (الشكل 7.1)، ولنفرض P_1 الضغط الستاتيكي للمائع عند النقطة الأولى، و P_2 الضغط الستاتيكي في نقطة أخرى تبعد L عن النقطة الأولى.

يعطى انخفاض الضغط الناتج عن احتكاك المائع بالأنبوب نتيجة اجتيازه للمسافة L بالعلاقة:

$$P = p_1 - p_2$$

وبالتعبير عن قوانين الاحتكاك الواردة سابقاً بصيغة جبرية نستطيع أن نكتب:

$$P_a = FSDv^2$$

حيث

P = الانخفاض في الضغط، lb/ft².

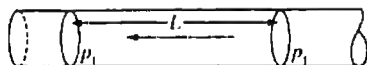
a = مساحة مقطع الأنبوب، ft^2 .

F = عامل يتعلق بطبيعة المائع وبطبيعة سطح الأنبوب.

S = مساحة التماس بين المائع والأنبوب، ft^2 .

D = كثافة المائع، lb/ft^3 .

v = سرعة الجريان، ft/s .



الشكل 7.1

وبالتالي:

$$P = \frac{1}{a} FSDv^2$$

وإذا عوضنا قيمة F بالقيمة الاختيارية $f/2g$ ، عندها ستصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$P = \frac{1}{a} fSD \frac{v^2}{2g}$$

ومن أجل الأنابيب الدائرية التي لها القطر d والطول L ، بالتالي $S = \pi.d.L$ ، و $a = \pi d^2/4$ ، وبالتعويض نجد:

$$P = \frac{4fLDv^2}{d^2g}$$

وإذا فرضنا أن W يمثل وزن المتدفق بالباوند لكل دقيقة، عندها

$$w = \frac{\pi d^2}{4} \times vD \times 60 = 47.12d^2vD$$

و

$$v = \frac{w}{47.12d^2D}$$

ولنفرض أن P يمثل مقدار انخفاض الضغط بالباوند لكل إنش مربع = $P/144$ ، إذا فرضنا d_1 القطر بالإنش = $12d$ وبالتعويض نجد:

$$P = 0.04839 \frac{fw^2L}{Dd_1^5}$$

يعطى العامل f وفق ما حدده Unwin كما يلي:

$$f = K \left(1 + \frac{3}{10d} \right) = K \left(1 + \frac{3.6}{d_1} \right)$$

وتستخدم القيمة الأشهر للعامل K للبخار التي حددها العالم Babcock 0.0027، وبالتعويض نجد:

$$p = 0.0001306w^2L \frac{1 + 3.6/d_1}{Dd_1^5}$$

حيث

P = انخفاض الضغط، lb/in².

w = وزن البخار المتدفق، lb/min.

L = طول الأنبوب، ft.

d_i = قطر الأنبوب، in.

D = الكثافة الوسطية للبخار، lb/ft³.

معادلات مسخنات الماء الساخن ذات الحجم المنزلي

$$H_{\text{OUTPUT}} = \text{GPH} \times 8.34 \text{ LBS/GAL} \times \Delta T \times 1.0$$

$$H_{\text{INPUT}} = \frac{\text{GPH} \times 8.34 \text{ LBS/GAL} \times \Delta T}{\% \text{EFFICIENCY}}$$

$$\text{GPH} = \frac{H_{\text{INPUT}} \times \% \text{EFFICIENCY}}{\Delta T \times 8.34 \text{ LBS/GAL}}$$

$$= \frac{\text{KW} \times 3413 \text{ BTU/KW}}{\Delta T \times 8.34 \text{ LBS/GAL}}$$

$$\Delta T = \frac{H_{\text{INPUT}} \times \% \text{EFFICIENCY}}{\text{GPH} \times 8.34 \text{ LBS/GAL}}$$

$$= \frac{\text{KW} \times 3413 \text{ BTU/KW}}{\text{GPH} \times 8.34 \text{ LBS/GAL}}$$

$$\text{KW} = \frac{\text{GPH} \times 8.34 \text{ LBS/GAL} \times \Delta T \times 1.0}{3413 \text{ BTU/KW}}$$

$$\% \text{COLD WATER} = \frac{T_{\text{HOT}} - T_{\text{MIX}}}{T_{\text{HOT}} - T_{\text{COLD}}}$$

$$\% \text{HOT WATER} = \frac{T_{\text{MIX}} - T_{\text{COLD}}}{T_{\text{HOT}} - T_{\text{COLD}}}$$

حيث

H_{OUTPUT} = استطاعة التسخين، خرج.

H_{INPUT} = استطاعة التسخين، دخل.

GPH = التدفق المستخلص، gal/h.

ΔT = ارتفاع درجة الحرارة، °F.

KW - كيلو واط.

T_{COLD} = درجة حرارة الماء البارد، °F.

T_{HOT} = درجة حرارة الماء الساخن، °F.

T_{MIX} = درجة حرارة الماء المزوج، °F.

استطاعة التسخين للمشعات والمبادلات

تعطى استطاعة التسخين للمشع بالعلاقة:

Btu المنبعثة في الساعة لغرفة درجة حرارتها 70° ودرجة حرارة البخار 215° -

(lb/h كتلة مكثفة) $\times 970 \times$ عامل تصحيح. (.....)

حيث يعطى عامل التصحيح كما يلي:

$$C_s = \left[\frac{(215 - 70)}{\text{درجة حرارة الغرفة} - \text{متوسط درجة حرارة البخار}} \right]^{1.3}$$

تعطى كمية الحرارة المنبعثة من مبادل التسخين بالبخار بنفس المعادلة (*) السابقة ولكن بعامل تصحيح يعطى كما يلي:

$$C_s = \left(\frac{215 - 65}{t_s - t_i} \right)^{1.5}$$

حيث

C_s = معامل التصحيح الذي سيطبق في المعادلة (*) السابقة.

t_s = درجة حرارة البخار المعاكسة بالتجربة.

t_i = متوسط درجة حرارة الهواء الداخل المقاسة بالتجربة.

لقد تم وضع القوة 1.5 تجريبياً وذلك لتعطي الشكل المناسب للمبادلات.

ويعطى معامل التصحيح المستخدم في مبادلات التسخين بالماء الساخن بالعلاقة التالية:

$$C_w = \left[\frac{\theta_s - 65}{(\theta_1 + \theta_2)/2 - t_i} \right]^{1.5}$$

C_w = معامل التصحيح المستخدم في مبادلات التسخين بالماء الساخن.

θ_s = إحدى درجات حرارة الماء الوسطية القياسية 170، 190، 210، 230°.

θ_1 = درجة حرارة الدخول للماء، deg.

θ_2 = درجة حرارة الخروج للماء، deg.

تقدير هواء التزويد للغرفة اعتماداً على محتوى CO_2

يُحسب هواء التزويد لكل قاطن (ساكن بالغرفة) وفق قياس نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 كما يلي، مفترضين بأن معدل إنتاج الفرد الواحد من غاز ثاني أكسيد الكربون مقدراً بـ CFH هو $0.6 \text{ ft}^3/\text{h}$.

$$\frac{CFH(CO_2 - X)}{10,000} = 0.6$$

حيث

CFH = الهواء الواجب تزويده للغرفة لكل قاطن، ft^3/h .

CO_2 = نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في هواء الغرفة مقدراً بجزء لكل 10,000 جزء.

X = نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في الهواء الخارجي مقدراً بجزء لكل 10,000 جزء (يؤخذ عادةً 4)

ومنه

$$CFH = \frac{6000}{CO_2 - X}$$

المردود واستطاعة الدخول لروحة الهواء

نستطيع تحديد الاستطاعة اللازمة لتحريك الهواء ضمن مجاري الهواء عبر تطبيق المعادلات التالية، ولكن دعنا أولاً نفرض ما يلي:

p = الضغط الكلي مقدراً بعمود ماء، in.

a = مساحة مقطع مجرى الهواء، ft².

v = سرعة الهواء، ft/min.

وبعد تطبيق عوامل التحويل المناسبة لتغيير واحدة الضغط الكلي إلى الباوند لكل قدم مربع، نحصل على ما يلي:

$$Ahp = \frac{pav \times 144}{12 \times 2.31 \times 33,000}$$

أو

$$Ahp = 0.000157 pav$$

حيث يُمثل الرمز Ahp الاستطاعة اللازمة لتحريك الهواء بالحصان البخاري، وإذا كان q يمثل حجم الهواء المار خلال دقيقة بالقدم المكعب فعندها:

$$q = av$$

وبالتالي:

$$A_{hp} = 0.000157pq = \frac{pq}{6356}$$

حيث يقدر الضغط p هنا بالإنش من الماء.

وإذا كان الضغط معبراً عنه بارتفاع عمود مكافئ من الهواء، h ، فتصبح العلاقة:

$$A_{hp} = \frac{hDQ}{33,000}$$

حيث

D = كثافة الهواء، lb/ft^3 .

Q = تدفق الهواء، ft^3/min .

يعتبر فرق الضغط الفعلي للمروحة هو جزء من فرق الضغط الناتج عنها بشكل نظري v^2/g ، ويؤخذ عادةً بشكل تقريبي على الشكل $k v^2/g$ ، ولذلك تعطى الاستطاعة المطلوبة بالحصان البخاري H_p لقيادة المروحة بالعلاقة:

$$H_p = \frac{ckv^2}{g} \times \frac{DQ}{33,000}$$

حيث يمثل الرمز c عامل يأخذ بالحسبان مقدار الضياعات الميكانيكية في المروحة، ويتجميع كل العوامل الثابتة بعامل واحد نحصل على العلاقة:

$$H_p = Kv^2QD$$

حيث يصبح الرمز v هنا دالاً على السرعة المحيطية والتي تتغير مباشرة بتغير سرعة دوران المروحة، وبما أن Q تتغير أيضاً بتغير السرعة، فعندها تصبح الاستطاعة المطلوبة تابعة لمكعب السرعة.

يعرف مردود المروحة الستاتيكي على أنه حاصل ضرب المردود الميكانيكي بالنسبة بين الضغط الستاتيكي إلى الضغط الكلي، ويحدد المردود الميكانيكي ME وفق العلاقة التالية:

$$ME = \frac{Ahp}{input\ Hp}$$

$$ME = \frac{pq}{6356\ Hp}$$

حيث يعبر الرمز Hp عن استطاعة الدخل مقدرة بالحصان البخاري.

$$\frac{\text{الضغط الستاتيكي}}{\text{الضغط الكلي}} \times \frac{pq}{6356\ Hp} = SE \text{ المردود الستاتيكي}$$

$$\frac{P_s q}{6356\ Hp} = SE$$

حيث

P_s = الضغط الستاتيكي.

قطر مجرى الهواء الدائري المقطع المكافئ للمجرى المستطيل

يعطى قطر مجرى الهواء الدائري المقطع المكافئ في المقاومة والتدفق للمجرى ذي المقطع المستطيل ببعدين A و B بالعلاقة التالية:

$$D = 1.265 \sqrt[3]{\frac{(AB)^3}{A + B}}$$

حيث يمثل A و B ضلعي المجرى المستطيل و D يمثل قطر المجرى الدائري المقطع.

ضباغات الضغط في مجاري الهواء

يعرف التعبير العام المحدد لاحتكاك الموائع ضمن الأنابيب بالمعادلة المروحية (Fanning formula) ويمكن تطبيقها بشكل تقريبي على الهواء كما يلي:

$$p = f \frac{S}{a} D \frac{v^2}{2g}$$

حيث

P = الضغط المطلوب للتغلب على الاحتكاك، lb/ft².

a = مساحة مقطع المجرى، ft².

D = كثافة الهواء، lb/ft³.

v = السرعة، ft/s.

f = عامل الاحتكاك.

S = مساحة التماس (المحيط × الطول).

ومن أجل هواء نظامي (عند درجة حرارة 70° وبضغط زئبقي بمقياس الضغط الجوي. 29.92 in) تصبح العلاقة:

$$p = \frac{0.03FL}{d^{1.24}} \left(\frac{v}{1000} \right)^{1.84}$$

حيث

F = عامل الخشونة.

L = طول المجرى، ft.

d = قطر المجرى، in.

P, v كما في المعادلة السابقة.

الكبح الناتج عن وجود مصفاة هواء مغبرة

يعبر عن الكبح الناتج عن وجود الغبار في الفلتر عادةً بنسبة مئوية كما يلي:

$$E = 1 - \frac{G_1}{G_0}$$

حيث

$$E = \text{الكبح.}$$

$$G_1 = \text{تركيز الغبار خلف المصفاة.}$$

$$G_2 = \text{تركيز الغبار أمام المصفاة.}$$

تمثل قدرة التقاط الغبار لمصفاة غير آلية بكمية أو وزن الغبار القياسي الذي ستلتقطه المصفاة بدون أن تتجاوز المقاومات التالية:

0.18 in من أجل الأنواع ذات المقاومة المنخفضة.

0.5 in من أجل الأنواع ذات المقاومة المتوسطة.

1.00 in من أجل الأنواع ذات المقاومة العالية.

تفيدنا هذه المقاومات في تصنيف المصافي، حيث تستخدم المصافي ذات المقاومة المنخفضة عادةً في العمل في أفران الهواء الساخن وفي وحدات تكييف الهواء. وتستخدم المصافي ذات المقاومة المتوسطة في أنظمة المراوح المركزية، بينما تعتبر المصافي ذات المقاومة العالية مناسبة أكثر لتنقية الهواء الداخل إلى الضواغط أكثر منها في تنقية هواء أنظمة تكييف الهواء.

كمية الحرارة المنتقلة عبر الجدار

يعبر عن الريح في كمية الحرارة عبر الجدار بالعلاقة التالية:

$$H = H_i + H_R$$

حيث

H_i = كمية الحرارة التي يتم ربحها والناجمة عن اختلاف درجات حرارة الهواء.

$$H_i = AU (t_o - t)$$

حيث

A = مساحة الجدار، ft^2 .

U = عامل انتقال الحرارة، $Btu/(ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F)$.

t_o = درجة حرارة الهواء الخارجي، $^\circ F$.

t = درجة حرارة الهواء داخل الغرفة، $^\circ F$.

و

$$H_R = AFal$$

حيث

H_R = الربح الحراري الناتج عن الإشعاع الشمسي.

A = مساحة الجدار أو السطح، ft^2 .

F = القسم المتص من الإشعاع الشمسي والمنتقل إلى الداخل، يعبر عنه بكسر عشري.

a = قسم من الإشعاع الشمسي المرتطم بالجدار والممتص من قبل سطح الجدار، يعبر عنه بكسر عشري.

I = الكثافة الحقيقية للإشعاع الشمسي المصطدم بالسطح، $Btu/(h \cdot ft^2)$.

تتبع قيمة F عامل انتقال الحرارة للجدار، وذلك وفق العلاقة التقريبية التالية:

$$F = 0.23U$$

بالتعويض تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$H_R = 0.23AUaI$$

تعطى المراجع الهندسية قيمتي العاملين a و I .

فرق درجات الحرارة الوسطي لوشائع تبريد نظام الماء المبرّد

تعتمد كمية الحرارة المنقولة عبر وشائع تبريد نظام الماء المبرّد على فرق درجات الحرارة الوسطي MTD بين الهواء والماء في الأنابيب، والتي يمكن حسابها من العلاقة:

$$MTD = \frac{(t_a - t'_w) - (t'_a - t_w)}{\ln[(t_a - t'_w)/(t'_a - t_w)]}$$

حيث

MTD = فرق درجات الحرارة الوسطي، °F.

t_a = درجة حرارة الهواء الداخل، °F.

t'_a = درجة حرارة الهواء الخارج، °F.

t_w = درجة حرارة الماء الداخل، °F.

t'_w = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

ويحدد مقدار سطح التبادل بالعلاقة:

$$S = \frac{H}{K \times MTD}$$

حيث

S = سطح الرشيعية، ft².

H = كمية الحرارة المحسوسة المنقولة، Btu/h.

MTD = فرق درجات الحرارة الوسطي، °F.

K = عامل نقل $(h.ft^2.°F)$.

يعتمد عامل النقل K على تصميم الوشيعنة وسرعة الماء.

تعتمد كمية الماء المدارة على كمية الحرارة الكلية المنقولة من الهواء (كمية الحرارة المحسوسة وكمية الحرارة الكامنة) وعلى ارتفاع درجة حرارة الماء المسموح به.

مردود برج التبريد

تحدد درجة حرارة الهواء الرطبة من الفاعلية العظمى النظرية لبرج التبريد، ويعطى مردود التبريد بالعلاقة:

$$E = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t}$$

حيث

t = درجة حرارة الهواء الرطبة.

t_1 = درجة حرارة الماء الداخل للبرج.

t_2 = درجة حرارة الماء المغادر للبرج.

تتراوح قيمة المردود عادةً بين 70 و 75 بالمئة، كما ويبرد الماء عادةً ضمن مجال من 10° إلى 15°، وتستعلق درجة حرارة الماء المغادر للبرج بشكل كبير بدرجة الحرارة الرطبة الخارجية.

تصمم في بعض الأحيان غرف رش (مثل غاسل هواء مناسب) في حال كون حجم البرج محدوداً وتستخدم لتبريد ماء التكاثر.

تُفقد كمية من الماء من برج التبريد نتيجة التبخر وتيارات الحمل، وعلى سبيل المثال تفقد في أنظمة التبريد التي تستخدم وسيط تبريد مثل F-12 ما مقداره 0.06 غالون بالدقيقة لكل طن تبريد، وتقدر كمية الماء المستجرة من شبكة المدينة والضائعة (بدون وجود برج تبريد) من 1.5 إلى 2 غالون بالدقيقة لكل طن تبريد، وذلك تبعاً لدرجة حرارة الماء. لذلك من المفروض أن توفر أبراج التبريد حوالي 90 إلى 95 بالمئة من الماء المستجر من الشبكة.

معادلات التسخين وتكييف الهواء بنظام USCS و SI

ستعطى المعادلات التالية وفق نظام USCS ثم بواحدات نظام SI، وهكذا سنحقق مقارنة سهلة للمعادلات وفق واحداث الحملتين، وسنورد الاختصارات والرموز المستخدمة في المعادلات بعد استعراض المعادلات.

يستطيع المهندس الميكانيكي أن يحسب النتائج وفق نظامي الواحدات والمقارنة بينهما ليختار الأنسب.

$$H_S = 1.08 \frac{\text{Btu.min}}{\text{h.ft}^3 \cdot ^\circ\text{F}} \times \text{CFM} \times \Delta T$$

$$H_{SM} = 72.42 \frac{\text{kJ.min}}{\text{h.m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \times \text{CMM} \times \Delta T_M$$

$$H_L = 0.68 \frac{\text{Btu.min.lb DA}}{\text{h.ft}^3 \cdot \text{gr H}_2\text{O}} \times \text{CFM} \times \Delta W$$

$$H_{LM} = 177,734.8 \frac{\text{kJ.min.kg DA}}{\text{h.m}^3 \cdot \text{kg H}_2\text{O}} \times \text{CMM} \times \Delta W_M$$

$$H_T = 4.5 \frac{\text{lb. min}}{\text{h. ft}^3} \times \text{CFM} \times \Delta h$$

$$H_{TM} = 72.09 \frac{\text{kg. min}}{\text{h. m}^3} \times \text{CMM} \times \Delta h_M$$

$$H_T = H_S + H_L$$

$$H_{TM} = H_{SM} + H_{LM}$$

$$H = 500 \frac{\text{Btu. min}}{\text{h. gal. } ^\circ\text{F}} \times \text{GPM} \times \Delta T$$

$$H_M = 250.8 \frac{\text{kJ. min}}{\text{h. L. } ^\circ\text{C}} \times \text{LPM} \times \Delta T_M$$

$$\frac{\text{AC}}{\text{HR}} = \frac{\text{CMM} \times 60 \text{ min/h}}{\text{VOLUME}}$$

$$\frac{\text{AC}}{\text{HR}_M} = \frac{\text{CMM} \times 60 \text{ min/h}}{\text{VOLUME}_M}$$

$$^\circ\text{C} = \frac{^\circ\text{F} - 32}{1.8}$$

$$^\circ\text{F} = 1.8^\circ\text{C} + 32$$

حيث

H_S = كمية الحرارة المحسوسة، Btu/h.

H_{SM} = كمية الحرارة المحسوسة، KJ/h.

H_L = كمية الحرارة الكامنة، Btu/h.

H_{LM} = كمية الحرارة الكامنة، KJ/h.

H_T, H = كمية الحرارة الكلية، Btu/h.

H_{TM}, H_M = كمية الحرارة الكلية، KJ/h.

ΔT = فرق درجات الحرارة، $^\circ\text{F}$.

$$\Delta T_M = \text{فرق درجات الحرارة، } ^\circ\text{C}.$$

$$\Delta W = \text{فرق نسبة الرطوبة، gr H}_2\text{O/lb DA}.$$

$$\Delta W_M = \text{فرق نسبة الرطوبة، Kg H}_2\text{O/Kg DA}.$$

$$\Delta h = \text{فرق الانتالبي، Btu/lb DA}.$$

$$\Delta h_M = \text{فرق الانتالبي، KJ/Kg DA}.$$

$$\text{CFM} = \text{معدل تدفق الهواء، ft}^3/\text{min}.$$

$$\text{CMM} = \text{معدل تدفق الهواء، m}^3/\text{min}.$$

$$\text{GPM} = \text{معدل تدفق الماء، gal/min}.$$

$$\text{LPM} = \text{معدل تدفق الماء، L/min}.$$

$$\text{AC/HR} = \text{نسبة تغيير الهواء بالساعة، وفق النظام الإنكليزي}.$$

$$\text{AC/HR}_M = \text{نسبة تغيير الهواء بالساعة، وفق النظام SI}.$$

$$\text{AC/HR} = \text{AC/HR}_M$$

$$\text{VOLUME} = \text{حجم الفراغ، ft}^3.$$

$$\text{VOLUME}_M = \text{حجم الفراغ، m}^3.$$

$$\text{KJ/h} = \text{Btu/h} \times 1.055$$

$$\text{CMM} = \text{CFM} \times 0.02832$$

$$\text{LPM} = \text{GPM} \times 3.785$$

$$\text{KJ/Kg} = \text{Btu/lb} \times 2.326$$

$$\text{m} = \text{ft} \times 0.3048$$

$$\text{m}^2 = \text{ft}^2 \times 0.0929$$

$$m^3 = ft^3 \times 0.02832$$

$$Kg = lb \times 0.4536$$

$$1.0 \text{ GPM} = 500 \text{ lb بخار/h}$$

$$1.0 \text{ lb بخار/h} = 0.002 \text{ GPM}$$

$$1.0 \text{ lb H}_2\text{O/h} = 1.0 \text{ lb بخار/h}$$

$$Kg/m^3 = lb/ft^3 \times 16.017 \text{ (الكثافة)}$$

$$m^3/Kg = ft^3/lb \times 0.0624 \text{ (الحجم النوعي)}$$

$$Kg \text{ H}_2\text{O}/Kg \text{ DA} = gr \text{ H}_2\text{O}/lb \text{ DA} / 7000 = lb \text{ H}_2\text{O}/lb \text{ DA}$$

المعادلات التبادلية بين التدفق وانخفاض ضغط أنابيب البخار

$$\Delta P = \frac{0.01306W^2(1+3.6/ID)}{3600 \times D \times ID^5}$$

$$W = 60 \sqrt{\frac{\Delta P \times D \times ID^5}{0.01306 \times (1+3.6/ID)}}$$

$$W = 0.41667VA_{\text{INCHES}}D = 60VA_{\text{FEET}}D$$

$$V = \frac{2.4W}{A_{\text{INCHES}}D} = \frac{W}{60A_{\text{FEET}}D}$$

حيث

ΔP = هبوط الضغط لكل 100 قدم من الأنبوب (psig/100 ft).

W = معدل تدفق البخار، lb/h.

ID = القطر الداخلي الفعلي للأنبوب، in.

D = الكثافة الوسطية للبخار عند الضغط العامل ضمن النظام، lb/ft³.

V = سرعة البخار ضمن الأنبوب، ft/min.

A_{INCHES} = مساحة مقطع الأنبوب الفعلية، in².

A_{FEET} = مساحة مقطع الأنبوب الفعلية، ft².

معادلات نواتج التكثيف على الأنابيب

$$FS = \frac{H_{SSS} - H_{SCR}}{H_{LCR}} \times 100$$

$$W_{CR} = \frac{FS}{100} \times W$$

حيث

FS = البخار المتجمع، %.

H_{SSS} = كمية الحرارة المحسوسة عند ضغط تزويد البخار، Btu/lb.

H_{SCR} = كمية الحرارة المحسوسة عند ضغط التكاثف العائد، Btu/lb.

H_{LCR} = كمية الحرارة الكامنة عند ضغط التكاثف العائد، Btu/lb.

W = معدل تدفق البخار، lb/h.

W_{CR} = التدفق المستكاثف كنسبة مئوية من البخار المتجمع الناتج عن عملية

التكاثف، lb/h. استخدم هذه النسبة من تدفق البخار في معادلة البخار السابقة لتحديد حجم أنبوب التكاثف العائد.

معادلات مردود HVAC

$$COP = \frac{BTU \text{ OUTPUT}}{BTU \text{ INPUT}} = \frac{EER}{3.413}$$

$$EER = \frac{BTU \text{ OUTPUT}}{WATTS \text{ INPUT}}$$

معدل الاشعال الأصغري: معدّل الاشعال الأعظمي - نسبة الإنزال

(والتي هي بحوالي 5:1, 10:1, 25:1)

$$\text{OVER ALL THERMAL EFF} = \frac{\text{GROSS BTU OUTPUT}}{\text{GROSS BTU INPUT}} \times 100\%$$

$$\text{COMBUSTION EFF} = \frac{\text{BTU INPUT} - \text{BTU STACK LOSS}}{\text{BTU INPUT}} \times 100\%$$

بجال المردود الحراري الكلي % 90 - % 75.

بجال مردود الاحتراق % 95 - % 85.

معادلات غرفة الامتصاص المكافئة لنظام HVAC

إذا كانت الغرف المكافئة مغلقة تماماً:

$$\text{CFM} = 100 \times G^{0.5}$$

حيث

CFM = تدفق الهواء المطلوب إطراره، ft³/min.

G = كتلة وسيط التبريد للنظام الأكبر، lb.

أما إذا كانت الغرف المكافئة مغلقة جزئياً.

$$\text{FA} = G^{0.5}$$

حيث

FA = المساحة المفتوحة للامتصاص الحر، ft².

G = كتلة وسيط التبريد للنظام الأكبر، lb.

المعادلات البسايكومترية

لقد أخذنا المعادلات التالية من منشورات شركة Carrier (من كتاب NewYork، McGraw-Hill، Handbook of Air-Conditioning System Design)، وتغطي هذه المعادلات مجالات مزج الهواء وأحمال التبريد وعامل كمية الحرارة المحسوسة وعامل التمرير الجانبي ودرجات الحرارة عند الأجهزة ودرجة حرارة هواء التزويد وكمية الهواء وأمثلة ثوابت الهواء. وسنعرف قبل سرد المعادلات بالرموز والاختصارات التي سنستخدمها.

الاختصارات

adp - نقطة الندى للجهاز.

BF - عامل التمرير الجانبي.

(OALH) (BF) - كمية الحرارة الكامنة للهواء الخارجي الممر جانبياً.

(OASH) (BF) - كمية الحرارة المحسوسة للهواء الخارجي الممر جانبياً.

(OATH) (BF) - كمية الحرارة الكلية للهواء الخارجي الممر جانبياً.

Btu/h - وحدة حرارية بريطانية في الساعة.

cfm - قدم مكعب في الدقيقة ft^3/min .

db - مقياس حرارة جانبي (بموجلة جافة).

dp - نقطة الندى.

ERLH - كمية الحرارة الكاملة الفعالة للغرفة.

ERSH - كمية الحرارة المحسوسة الفعالة للغرفة.

ERTH - كمية الحرارة الكلية الفعالة للغرفة.

ESHF = عامل كمية الحرارة المحسوسة الفعّالة.

$^{\circ}\text{F}$ = درجة فهرنهايت.

fpm = قدم بالدقيقة، ft/min.

gpm = غالون بالدقيقة، gal/min.

gr/lb = حبات أو قطرات بالباوند.

GSHF = عامل كمية الحرارة المحسوسة الإجمالي.

FTH = كمية الحرارة الكلية الإجمالية.

GTHS = كمية الحرارة الكلية الإجمالية المضافة.

OALH = كمية الحرارة الكامنة للهواء الخارجي.

OASH = كمية الحرارة المحسوسة للهواء الخارجي.

OATH = كمية الحرارة الكلية للهواء الخارجي.

rh = الرطوبة النسبية.

RLH = كمية الحرارة الكامنة للغرفة.

RLHS = كمية الحرارة الكامنة الإضافية للغرفة.

RSH = كمية الحرارة المحسوسة للغرفة.

RSHF = عامل كمية الحرارة المحسوسة للغرفة.

RTH = كمية الحرارة الكلية للغرفة.

Sat Eff = قدرة الإشباع للرشاشات.

SHF = عامل كمية الحرارة المحسوسة.

TLH = كمية الحرارة الكامنة الكلية.

TSH = كمية الحرارة المحسوسة الكلية.

Wb = مقياس حرارة رطب (بموجلة رطبة).

الرموز

Cfm_{ba} = كمية الهواء المار جانباً حول الجهاز.

Cfm_{da} = كمية الهواء المزالة رطوبته.

Cfm_{oa} = كمية الهواء الخارجي.

Cfm_{ra} = كمية الهواء المعاد.

Cfm_{sa} = كمية هواء التزويد.

h = الانتالبي النوعي.

h_{adp} = انتالبي نقطة الندى للجهاز.

h_{cs} = انتالبي درجة حرارة السطح الفعّال.

h_{ea} = انتالبي الهواء الداخل.

h_{ia} = انتالبي الهواء الخارج.

h_m = انتالبي الهواء المزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.

h_{oa} = انتالبي الهواء الخارجي.

h_{rm} = انتالبي هواء الغرفة.

h_{sa} = انتالبي هواء التزويد.

t = درجة الحرارة.

- t_{adp} = درجة حرارة نقطة الندى للجهاز.
- t_{edb} = درجة الحرارة الرطبة للهواء الداخل.
- t_{es} = درجة حرارة السطح الفعّال.
- t_{ew} = درجة حرارة الماء الداخل.
- t_{ewb} = درجة الحرارة الرطبة للماء الداخل.
- t_{ldb} = درجة الحرارة الجافة للهواء الخارج.
- t_{lw} = درجة حرارة الماء الخارج.
- t_{lwb} = درجة الحرارة الرطبة للهواء الخارج.
- t_m = درجة الحرارة الجافة للهواء الممزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.
- t_{oa} = درجة الحرارة الجافة للهواء الخارجي.
- t_{rm} = درجة الحرارة الجافة للغرفة.
- t_{ra} = درجة الحرارة الجافة لهواء التزويد.
- W = الرطوبة النوعية أو محتوى الرطوبة.
- W_{adp} = محتوى رطوبة نقطة الندى للجهاز.
- W_{es} = محتوى الرطوبة للهواء الداخل.
- W_{es} = محتوى رطوبة درجة حرارة السطح الفعّال.
- W_{la} = محتوى رطوبة الهواء الخارج.
- W_m = محتوى رطوبة الهواء الممزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.
- W_{oa} = محتوى رطوبة الهواء الخارجي.

W_m = محتوى رطوبة الغرفة.

W_{sa} = محتوى رطوبة هواء التزويد.

معادلات مزج الهواء (الهواء الخارجي والهواء المعاد)

$$t_m = \frac{(cfm_{oa} \times t_{oa}) + (cfm_{ra} \times t_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$h_m = \frac{(cfm_{oa} \times h_{oa}) + (cfm_{ra} \times h_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$W_m = \frac{(cfm_{oa} \times W_{oa}) + (cfm_{ra} \times W_{rm})}{cfm_{sa}}$$

معادلات حمل التبريد

$$ERSH = RSH + (BF) (OASH) + RSHS^{\dagger}$$

$$ERLH = RLH + (BF) (OALH) + RLHS^{\dagger}$$

$$ERTH = ERLH + ERSR$$

$$TSH = RSH + OASH + RSHS^{\dagger}$$

$$TLH = RLH + OALH + RLHS^{\dagger}$$

$$GTH = TSH + TLH + GTHS^{\dagger}$$

$$RSH = 1.08^{\ddagger} \times cfm_{sa} \times (t_{rm} - t_{sa})$$

$$RLH = 0.68^{\ddagger} \times cfm_{sa} \times (W_m - W_{sa})$$

[†] تعتبر الأحمال GTHS و RLHS و RSHS هي أحمال تكميلية وتعتبر كمية حرارة يكتسبها مجرى الهواء، وضيعات التسرب من المجرى والرياح الحراري الناتج عن استنطاعة المروحة والمضخة.

[‡] انظر قيم أمثال ثوابت الهواء التي سنقوم بحسابها لاحقاً.

$$RTH = 4.45^{\dagger} \times cfm_{ra} \times (h_{rm} - h_{ra})$$

$$RTH = RSH + RLH$$

$$OASH = 1.08 \times cfm_{oa} (t_{oa} - t_{rm})$$

$$OALH = 0.68 \times cfm_{oa} (W_{oa} - W_{rm})$$

$$OATH = 4.45 \times cfm_{oa} (h_{oa} - h_{rm})$$

$$OATH = OASH + OALH$$

$$(BF) (OATH) = (BF) (OASH) + (BF) (OALH)$$

$$ERSH = 1.08 \times cfm_{da}^{\S} \times (t_{rm} - t_{adp}) (1 - BF)$$

$$ERLH = 0.68 \times cfm_{da}^{\S} \times (W_{rm} - W_{adp}) (1 - BF)$$

$$ERTH = 4.45 \times cfm_{da}^{\S} \times (h_{rm} - h_{adp}) (1 - BF)$$

$$TSH = 1.08 \times cfm_{da}^{\S} \times (t_{edb} - t_{ldb})^{\dagger}$$

$$TLH = 0.68 \times cfm_{da}^{\S} \times (W_{ea} - W_{la})^{\dagger}$$

$$GTH = 4.45 \times cfm_{da}^{\S} \times (h_{ea} - h_{la})^{\dagger}$$

معادلات عوامل كمية الحرارة المحسوسة

$$RSHF = \frac{RSH}{RSH + RLH} = \frac{RSH}{RTH}$$

$$ESHF = \frac{ERSH}{ERSH + ERLH} = \frac{ERSH}{ERTH}$$

$$GSHF = \frac{TSH}{TSH + TLH} = \frac{TSH}{GTH}$$

[§] عندما يكون هناك هواء محمر جانبياً حول أجهزة التكييف، $cfm_{da} = cfm_{ea}$.

معادلات عامل التمرير الجانبي

$$BF = \frac{t_{ldb} - t_{adp}}{t_{edb} - t_{adp}}$$

$$BF = \frac{W_{la} - W_{adp}}{W_{ea} - W_{adp}}$$

$$BF = \frac{h_{la} - h_{adp}}{h_{ea} - h_{adp}}$$

$$1 - BF = \frac{t_{edb} - t_{ldb}}{t_{edb} - t_{adp}}$$

$$1 - BF = \frac{W_{ea} - W_{la}}{W_{ea} - W_{adp}}$$

$$1 - BF = \frac{h_{ea} - h_{la}}{h_{ea} - h_{adp}}$$

معادلات درجة الحرارة عند الأجهزة

$$t_{edb} = \frac{(cfm_{oa} \times t_{oa}) + (cfm_{ra} \times t_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$t_{ldb} = t_{adp} + BF(t_{edb} - t_{adp})$$

تعتمد كلتا درجتي الحرارة t_{wb} و t_{lwb} على القيم المحسوبة للانثالي h_{ea} و h_{la} على المخطط البسايكرومترى.

$$h_{ea} = \frac{(cfm_{oa} \times h_{oa}) + (cfm_{ra} \times h_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$h_{la} = h_{adp} + BF(h_{ea} - h_{adp})$$

معادلة درجة حرارة هواء التزويد

$$t_{sa} = t_{rm} - \frac{RSH}{1.08cfm_{sa}}$$

معادلات كميات الهواء

$$cfm_{da} = \frac{ERSH}{1.08(1 - BF)(t_{rm} - t_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{ERLH}{0.68(1 - BF)(W_{rm} - W_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{ERTH}{4.45(1 - BF)(h_{rm} - h_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{TSH}{1.08(t_{edb} - t_{ldb})}$$

$$cfm_{da} = \frac{TLH}{0.68(W_{ea} - W_{la})}$$

$$cfm_{da} = \frac{GTH}{4.45(h_{ea} - h_{la})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RSH}{1.08(t_{rm} - t_{sa})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RLH}{0.68(W_{rm} - W_{sa})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RTH}{4.45(h_{rm} - h_{sa})}$$

$$cfm_{ba} = cfm_{sa} - cfm_{da}$$

ملاحظة: ستكون قيمة Cfm_{da} أقل من Cfm_{sa} فقط عندما يمرر الهواء جانبياً حول تجهيزات التكييف.

$$cfm_{sa} = cfm_{oa} + cfm_{ra}$$

† عندما تساوي قيم t_m و W_m و h_m لقيم الدخل لأجهزة التبريد، فإنه يمكن استبدالهم بالقيم h_{ea} و W_{ea} و h_{la} على التوالي.

أمثال ثوابت الهواء

$$1.08 = 0.244 \times \frac{60}{13.5}$$

حيث

0.244 = الحرارة النوعية للهواء الرطب عند الدرجة 70 °Fdb و 50 % rh ،
(Btu/F° .lb DA).

60 = دقيقة بالساعة.

13.5 = الحجم النوعي للهواء الرطب عند 70 °Fdb و 50 % rh.

$$0.68 = \frac{60}{13.5} \times \frac{1076}{7000}$$

حيث

60 = دقيقة بالساعة.

13.5 = الحجم النوعي للهواء الرطب عند 70 °F db و 50 % rh.

1076 = متوسط كمية الحرارة الواجب طرحها لتكثيف لبيرة واحدة من بخار الماء
الموجود في هواء الغرفة.

7000 = gr/lb.

$$4.45 = \frac{60}{13.5}$$

تدل الأرقام على نفس دلالتها في العلاقة السابقة.

المعادلات في حال وجود مصائد بخار

يعتمد اختيار تركيب مصائد البخار على ماسورات البخار الصاعدة على حمل تسخين الأنبوب وعلى حمل الإشعاع الحراري الصادر عن الأنبوب. ويقصد بحمل تسخين الأنبوب نواتج التكثيف التي تتشكل عند تسخين سطح الأنبوب عندما يمر البخار لأول مرة. وللحصول على نتائج عملية يجب أن تكون درجة حرارة الأنبوب النهائية مساوية لدرجة حرارة البخار. ويمكن تحديد حمل تسخين الأنبوب وفق العلاقة:

$$C_1 = \frac{W(t_f - t_i)(0.114)}{h_i T}$$

حيث

C_1 = التكاثف الناتج عن التسخين، lb/h.

W = الوزن الكلي للأنبوب، lb (يؤخذ من جداول المراجع الهندسية).

t_f = درجة حرارة الأنبوب النهائية، °F (درجة حرارة البخار).

t_i = درجة حرارة الأنبوب الابتدائية، °F (تؤخذ عادة مساوية لدرجة حرارة الغرفة).

0.114 = ثابت الحرارة النوعية للأنايب الفولاذية أو أنابيب الحديد المطاوع (0.092 للأنايب النحاسية).

h_i = الحرارة الكامنة للبخار، Btu/lb (يؤخذ من جداول البخار).

T = الزمن اللازم للتسخين، h.

أما حمل الإشعاع فهو نواتج التكاثف المتشكلة من ضياعات الإشعاع للأنايب غير المعزولة والتي لا يمكن تجنبها.

وبحسب هذا الحمل من المعادلة التالية والذي يعتمد على الهواء الساكن المحيط بأنابيب البخار:

$$C_2 = \frac{LK(t_f - t_i)}{h_l}$$

حيث

C_2 = التكاثف الناتج عن الإشعاع، lb/h.

L = الطول الخطي للأنبوب، ft.

K = معامل النقل الحراري، Btu/(h.lin ft.°F).

يشكل حمل الإشعاع كما حمل التسخين قطرات تحت ظروف العمل الطبيعية، وتحدث ذروة هذا التشكل عند منتصف دورة التسخين، لذلك يضاف نصف حمل الإشعاع إلى حمل التسخين عندما يراد تحديد كمية نواتج التكاثف التي على مصائد البخار اصطياها.

عامل الأمان

توصي الدراسات العملية الجيدة باستخدام عوامل أمان عندما يُراد اختيار مصائد السبخار، وربما نحتاج لعوامل أمان قد تصل من 2 إلى 1 أو بأعلى قيم من 8 إلى 1 وذلك للأسباب التالية:

1. قد يتغير ضغط البخار عند مدخل المصيدة أو الضغط الخلفي عند تفريغ المصيدة. وهذا يغير سعة مصيدة البخار.
2. إذا تم اختيار حجم المصيدة ليتناسب مع حمل العمل الطبيعي، فقد تعود نواتج التكاثف إلى أنابيب البخار أو الأجهزة أثناء عملية الإقلاع أو أثناء عملية التسخين.
3. إذا تم اختيار المصيدة بحيث تفرغ كامل تدفق الماء وبشكل مستمر، فقد يصعب علينا إخراج الهواء من النظام.

وسنورد فيما يلي معلومات ترشدك إلى تقدير عامل الأمان:

الجدول 7.1 عوامل الأمان المأخوذة عند اختيار مصادد البخار

الجزء المراد تصميمه	عامل الأمان
خط تصريف البخار الرئيسي	3 إلى 1
صواعق تصريف البخار	2 إلى 1
بين المرحل ولهاية الخط الرئيسي	2 إلى 1
قبل صمام التخفيض	3 إلى 1
قبل صمام الإغلاق (في أوقات الإغلاق)	3 إلى 1
وشائع التصريف	3 إلى 1
أجهزة التصريف	3 إلى 1

عندما تريد استخدام مصيدة البخار في نظام ذي ضغط عمل عال، عليك تحديد فيما إذا كان النظام سيعمل تحت شروط ضغوط منخفضة عند أوقات محددة مثل منتصف الليل أو العطلة الأسبوعية، وإذا كان من المحتمل حدوث ذلك يجب إضافة عامل أمان إضافي لتتمكن المصيدة من التقاط القطرات المشكلة أثناء فترات العمل بضغط منخفض (خلال العمل الليلي).

8

معادلات الترموديناميك

مصطلحات وتعريف

a = مساحة المكبس (مع انخفاضات المكبس وقضبان الذيل إن وجدت)، in^2 (mm^2).

C = ثابت وهو يساوي 12 للمحركات رباعية الشوط و 20 للمحركات ثنائية الشوط.

C_p = الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت، $\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$ [$\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$].

C_v = الحرارة النوعية تحت حجم ثابت، $\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$ [$\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$].

c = الخلو، ويعبر عنه بكسر عشري من الإزاحة.

D = إزاحة المكبس (دورة/ m^3)، دورة/ ft^3 .

D' = إزاحة المكبس (دورة/ m^3)، دورة/ ft^3 .

d = التجويف، قطر الاسطوانة الداخلي، in (mm).

F = القوة الصرفة عند نقطة دوران الذراع، lb (N).

g_c = عامل التحويل ويمثل الجاذبية الأرضية (9.81 m/s^2) $(32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/(\text{lb} \cdot \text{s}^2))$.

h = الانتالي (ويساوي $u + pv/J$)، Btu/lb (KJ/Kg).

h_s = فرق ضغط التوقف، سائل ft (m).

h_t = فرق الضغط الكلي، سائل ft (m).

h_v = فرق ضغط السرعة، سائل ft (m).

h''_w = فرق الضغط، $\text{in H}_2\text{O}$ ($\text{mm H}_2\text{O}$).

h_1 = الانتالي عند مدخل الضاغط، Btu/lb (KJ/Kg).

h_2 = الانتالي عند مخرج (مصرف) الضاغط، Btu/lb (KJ/Kg).

J = المكافئ الميكانيكي للحرارة، 778 ft.lb/Btu.

k = نسبة الحرارة النوعية C_p/C_v .

L = طول الشوط، ft (m).

= طول ذراع الكبح (المسافة من مركز المحور وحتى نقطة دوران الذراع)، ft (m).

l = طول الشوط، in.

m = الوزن المولي، lb (Kg).

\dot{m} = عدد المولات، (Kg مول).

mep = الضغط الفعال الوسطي، psi (KPa).

N = سرعة دوران المحور، rpm.

= عدد المراحل.

n = عدد الدورات المنجزة في الدقيقة.

= الأس البولوتروبي، حيث $p v^n = \text{ثابت}$ العملية البوليتروبية.

P = الضغط، lb/ft² (KPa).

p_1 = ضغط الدخول (التزويد)، lb/ft² (KPa).

p_2 = ضغط الخروج (التصريف)، lb/ft² (KPa).

$\Delta p = p_c - p_b$ ارتفاع الضغط الناتج عن المضخة، lb/ft² (KPa).

Q = معدل التدفق الحجمي، ft³/min (m³/min).

= كمية الحرارة المستخلصة (التي يمكن استخلاصها)، Btu/hb (KJ/hg).

Q_1 = كمية الحرارة المضافة، Btu/lb (KJ/Kg).

Q_2 = كمية الحرارة المطروحة، Btu/lb (KJ/Kg).

ΔQ = كمية الحرارة المضافة أو المستخلصة، Btu/lb (KJ/Kg).

R = ثابت الغاز، من خواص الغاز أو المزيج.

R' = ثابت الغاز العام ويساوي 1544 ft.lb/(lb.°R).

R_p = نسبة الضغوط = $\frac{P_2}{P_1}$.

R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} = نسبة الضغوط للمراحل 1 و 2 و 3 على الترتيب.

R_t = نسبة درجات الحرارة = $\frac{T_2}{T_1}$.

R_v = نسبة الحجم = $\frac{V_1}{V_2}$.

S = الانتروبي، [KJ/(Kg.°C)] Btu/(lb.°F).

shp = استطاعة محور المحرك بالحصان البخاري، hp (KW).

T = درجة الحرارة المطلقة.

T_1 = درجة حرارة كمية الحرارة المضافة، °R.

T_2 = درجة حرارة كمية الحرارة المطروحة، °R.

ΔT = انخفاض درجة الحرارة لغازات العادم خلال المبادل الحراري، °F (°C).

u = الطاقة الداخلية أو الذاتية، Btu/lb (KJ/Kg).

du = التغير في الطاقة الداخلية، Btu/lb (KJ/Kg).

\bar{V} = السرعة، ft/s (m/s).

v = الحجم، ft³ (m³).

\bar{v} = الحجم النوعي، ft³/lb (m³/Kg).

w = الوزن، lb (Kg).

\bar{w}_f = كثافة السائل، lb/ft³ (Kg/m³).

\bar{w}_w = كثافة الماء، 62.4 lb/ft³ (998.4 Kg/m³).

d_w = العمل، ft.lbf (N.m).

ΔW = العمل المنجز على أو من السائل، ft.lbf (N.m/Kg).

Z = الطاقة الناتجة عن الارتفاع، ft.lbf/lbm (N.m/Kg mass).

1 = شروط الدخول أو الشروط الابتدائية.

2 = شروط المغادرة أو الشروط النهائية.

معادلة الطاقة العامة

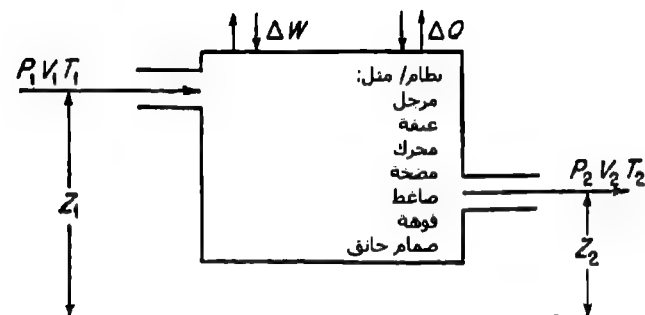
تعطى معادلة الطاقة العامة لحركة سائل ضمن نظام بالعلاقة:

$$Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g_c} + p_1 \bar{V}_1 + u_1 J = Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} + p_2 \bar{V}_2 + u_2 J + W \pm \Delta QJ$$

أو

$$Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g_c} + h_1 J = Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g_c} + h_2 J \pm \Delta W \pm \Delta QJ$$

يجب أن تكون جميع الحدود متوافقة في نظام الواحدات (أي أن تكون واحداً جميع الحدود متجانسة ومن نفس النظام).



الشكل 8.1

قوانين الغازات

يعطى قانون Boyle للغازات المثالية وعند درجة حرارة ثابتة بالعلاقة:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const}$$

ويعطى قانون Charles عند ضغط ثابت بالعلاقة:

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

ويعطى قانون Gay-Lussac عند حجم ثابت بالعلاقة:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

دمج قوانين Boyle و Charles و Gay-Lussac: إذا كانت درجة الحرارة والضغط يتغيران معاً عندها يعطى الحجم بالعلاقة:

$$v_2 = v_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1}$$

معادلة خواص الغاز: يعطي دمج قانوني Boyle و Charles معادلة خواص الغاز المثالي:

$$pv = wRT$$

تؤخذ قيم R للغازات المختلفة من المراجع الهندسية.

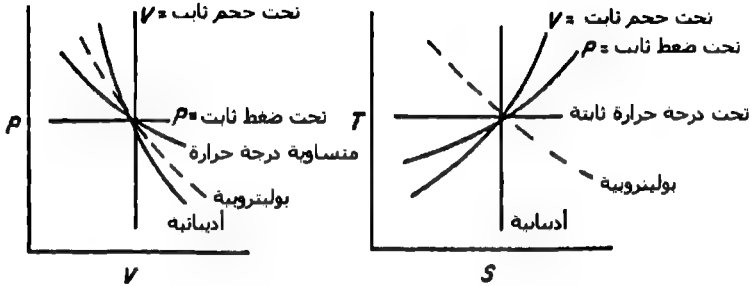
واعتماداً على فرضية Avogadro، تحتوي الحجم المتساوية من الغازات عند نفس الضغط ونفس درجة الحرارة على عدد متساوي من الجزيئات - أو يحتل الوزن الجزيئي بالباوند لكل غاز نفس الحجم (358.7 ft^3 عند الضغط 29.92 in Hg ودرجة الحرارة 32° F). يمكن استخدام هذه الحقيقة وجعل المعادلة السابقة تعطي الشكل المولي لمعادلة خواص الغاز:

$$pv = \bar{m}RT$$

لا تطبق هذه المعادلة أيضاً بشكل دقيق على الغازات الحقيقية، ولكن يمكننا استخدامها بدقة كافية للعديد من الحالات. ويمكننا إضافة عامل تصحيح على الطرف الأيمن من المعادلة السابقة لأخذ تأثير السلوك غير المثالي للغاز، حيث يضرب هذا العامل بالطرف الأيمن للمعادلة السابقة.

الأنواع أو العمليات المطبقة على الغازات المثالية (التامة)

إذا تم وضع كمية من الغاز التام ضمن حرجلة (جسم) أو نظام، فهناك خمس طرق مختلفة لتحديد كيفية إضافة الطاقة أو الحصول عليها من ذلك النظام: عملية متساوية درجة الحرارة، عملية متساوية الانتروبي (أديباتية)، عملية تحت حجم ثابت، عملية تحت ضغط ثابت، عملية بوليتروبية. ويوضح الشكل 8.2 هذه العمليات الخمس.



الشكل 8.2

سنورد في الجدول التالي المعادلات التي تحسب التغيرات في خصائص وأداء الغاز المثالي:

ونحسب قيمة الطاقة المضافة عبر تطبيق علاقة الطاقة التالية:

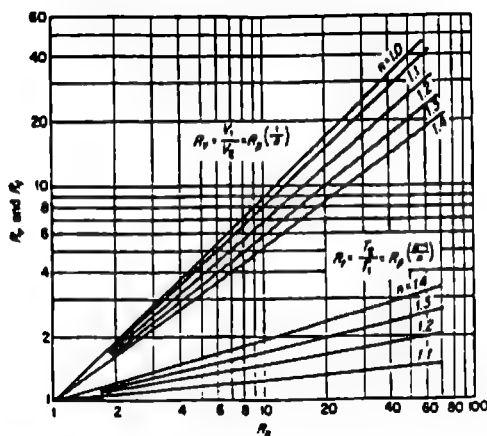
$$dQ = du + dw$$

وعند حساب تغيرات الضغط والحجم ودرجة الحرارة لقيم متغيرة للأسين n و k ، فإن من المفيد أن نتذكر بأن النسب وارتفاع النسب للقوى الأسية يمكن استخدامها وحسابها كعمليات قسمة وضرب وذلك لإيجاد الأجوبة العددية، وسيفيدك الشكل 8.3 في هذه الحالة.

العملية	العلاقة بين p, v, T	العمل غير المفكوك $\int_1^2 p \, dv$	Q	Δu	Δh	Δs
($T = \text{const}$) تحت درجة حرارة ثابتة	$p v_1 = p v_2$	$p v_1 \ln R_v$	$\frac{p v_1}{J} \ln R_v$	0	0	$\frac{wR}{J} \ln R_v$
تحت ضغط صفى ثابت $p = \text{const}$	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	$p(v_2 - v_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p \ln R_v$
تحت حجم ثابت ($v = \text{const}$)	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	0	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p \ln R_v$
(إنتروبية) ($S = \text{const}$)	$\frac{T_2}{T_1} = R_p^{-1}$ $= \left(\frac{1}{R_p}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$	$\frac{p v_2 - p v_1}{1 - \gamma}$	0	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	0
بولتروبية ($pv^\gamma = \text{const}$)	$\frac{T_2}{T_1} = R_p^{-1}$ $= \left(\frac{1}{R_p}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$	$\frac{p v_2 - p v_1}{1 - \gamma}$	$wC_v \frac{\gamma - \gamma}{1 - \gamma} (T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p \frac{\gamma - \gamma}{1 - \gamma} \ln R_v$

ملاحظة: $R_v = \frac{T_2}{v_1}$ $R_p = \frac{T_2}{p_1}$ $R_p = \frac{p_2}{p_1}$

الجدول 8.1 : علاقات الغازات المثالية



الشكل 8.3

أداء الضواغط

المواصفات القياسية للضواغط الأديباتية/إيزونتروبية

يبين الشكل 8.4 الدارة النظرية للضاغط حيث هناك ثلاث مراحل:

(1) الامتصاص من a إلى 1.

(2) الانضغاط من 1 إلى 2.

(3) الإفلات من 2 إلى b.

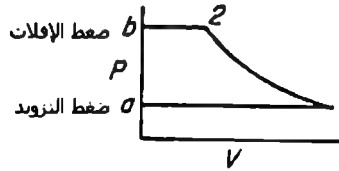
ويعطى العمل من أجل غاز مثالي ولضغط أديباتي عكوس (أو إيزونتروبي) بالعلاقة: $(pv^k = \text{const})$

$$\Delta W_{\text{adiabatic cycle}} = 144 p_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) (R_p^{(k-1)/k} - 1)$$

وإذا كان الانضغاط ايزونثروبياً ولغاز حقيقي معروف الخواص الترموديناميكية (مثل وسائط التبريد) عندها يعطى العمل لدورة واحدة لانضغاط تام وفق العلاقة:

$$\Delta W_{\text{adiabatic cycle}} = 778 (h_2 - h_1)$$

تعطي المعادلتان السابقتان أجوبةً مثالية إذا كان الغاز تاماً.



الشكل 8.4

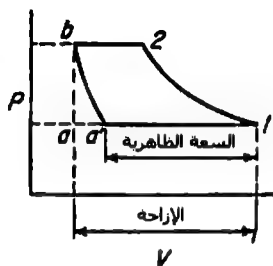
مواصفات الضاغط المتساوي درجة الحرارة

إذا تم تبريد الضاغط بشكل كبير للدرجة أن تبقى درجة الحرارة ثابتة خلال الانضغاط عندها سنحصل على عملية انضغاط متساوية درجة الحرارة، كما هو واضح على الشكل 8.5 ($p_v = \text{const}$). وسيكون هناك أيضاً تخفيض للعمل أكثر من العملية الأديابانية، ويعطى العمل وفق هذه الحالة بالعلاقة:

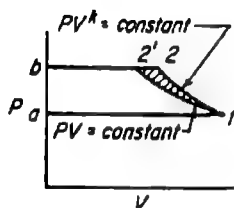
$$\Delta W_{\text{isothermal}} = 144 p_1 v_1 \ln R_p$$

مواصفات الضواغط متعددة المراحل

ينخفض عمل الضاغط عند استخدام الضغط متعدد المراحل مع تبريد الهواء بين المراحل، وإذا كان التبريد كاملاً ودخل الهواء إلى المرحلة الأخيرة بنفس درجة حرارة دخوله للضاغط، فعندها نقول بأن التبريد كان كاملاً وتاماً. عندها سيكون العمل المطلوب أصغرياً بقيم ضغط فريدة بين المراحل تدعى أفضل قيم ضغط مستقبلي، ويحدد العمل وفق العلاقة:



الشكل 8.6



الشكل 8.5

$$R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = \dots = R_p^{1/N}$$

وإذا كان الانضغاط ايزونثروبياً لكل مرحلة، أي أفضل ضغط مستقبل، مع وجود تبريد تام، عندها يعطى العمل اللازم لدورة نظرية وفق العلاقة:

$$\Delta W_{\text{multistage}} = 144 N p_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) (R_p^{(k-1)/Nk} - 1)$$

ومن الجدير بالذكر أنه يمكن تطبيق العلاقة ($\Delta W_{\text{isothermal}} = 144 p_2 v_2 \ln R_p$) للعملية متساوية درجة الحرارة على عملية الانضغاط المفردة أو ذات المراحل.

السعة

يعبر عن السعة بحجم الهواء المعطى على أساس هواء حر "free air"، وتقاس هذه السعة عند الظروف المحيطية من ضغط ودرجة حرارة ورطوبة.

ومن أجل الآلات ذات الإزاحة الموجبة بدون خلوص، عندها يعطى الحجم كما في الشكل 8.6 بالفرق $v_1 - v_2$ ، والذي تحصل عليه من أبعاد الاسطوانات.

$$\text{إزاحة المكبس} \quad f t^3 / \text{cycle} = D = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \left(\frac{l}{1728} \right)$$

$$\begin{aligned} D' = \text{إزاحة المكبس} \quad , f t^3 / \text{min} &= \frac{\pi d^2}{4} n l \left(\frac{l}{1728} \right) \\ &= \frac{d^2 l n}{2200} \end{aligned}$$

وبما أن الآلة تملك خلوصاً يتراوح بين 2 و 20 بالمئة من الإزاحة، أي هناك ضياع في إعادة التمدد الخلوصي، لذلك ستزاح النقطة a إلى الموضع 'a، ويصبح الطول $v'_a = v_a$ أقل من الإزاحة $v_1 - v_a$ في الشكل 8.6. ونستطيع حساب هذه السعة الظاهرية بالعلاقة:

$$\text{السعة الظاهرية} = D(1 + c - cR_p^{1/k})$$

ستكون السعة الحقيقية إذا ما قيست لضغط حقيقي أقل من هذه القيمة الظاهرية بسبب حرارة الامتصاص وانخفاض ضغط الامتصاص وضياعات التسرب.

وتدعى نسبة السعة إلى الإزاحة بالمردود الحجمي، وإذا تم أخذ القياسات السابقة الحقيقية عندها:

$$\text{المردود الحجمي الفعلي} \% = \frac{\text{السعة الحقيقية المقاسة}}{\text{إزاحة المكبس}} \times 100$$

أما إذا استخدمنا السعة الظاهرية عندها نجد:

$$\text{المردود الحجمي الظاهري} \% = (1 + c - cR_p^{1/k}) \times 100$$

وتدعى النسبة بين هذين المردودين بمردود الانزلاق ويعطى بالعلاقة:

$$\text{مردود الانزلاق \%} = \frac{\text{المردود الحجمي الفعلي}}{\text{المردود الحجمي الظاهري}} \times 100$$

الاستطاعة النظرية للضواغط (KW)

يمكن تطبيق معادلات العمل النظري الأربعة السابقة على الضواغط متضمنة الخلو، وذلك لأن العمل مستقل عن الخلو.

وإذا كان معدل التدفق الحجمي مساوياً للقيمة $100 \text{ ft}^3/\text{min}$ (m^3/min) عندها يمكن كتابة ما يلي:

$$\begin{aligned} \frac{\text{الاستطاعة لضغط أدياتي أو ايزونثروبي (hp)}}{100 \text{ ft}^3/\text{min}} &= \\ &= \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{2.292} (R_p^{(k-1)/k} - 1) \\ &= \frac{(h_2 - h_1) \text{ lb/min}}{0.4242 \bar{v}_1} \end{aligned}$$

حيث

\bar{v}_1 = الحجم النوعي، ft^3/lb عند ضغط الدخول (أو التزويد):

$$\frac{\text{الاستطاعة لضغط متساوي درجة الحرارة (hp)}}{100 \text{ ft}^3/\text{min}} = \frac{p_1}{2.292} \ln R_p$$

وفي حالة كون الضواغط متعدد المراحل مع وجود تبريد تام وأفضل ضغط مستقبل يمكن كتابة:

$$\frac{\text{الاستطاعة لضغط أديباتي أو ايزونثروبي}}{100 \text{ ft}^3/\text{min}} = \frac{Np_1}{2.292} \frac{k}{k-1} (R_p^{(k-1)/Nk} - 1)$$

مردود الضغط

تعطى النسبة بين الاستطاعة الفعلية المطلوبة للضاغط إلى الاستطاعة النظرية (لنفس السعة) بالعلاقة:

$$100 \times \frac{\text{الاستطاعة النظرية hp}}{\text{الاستطاعة الفعلية hp}} = \text{مردود الضغط \%}$$

يمكن إيجاد الاستطاعة النظرية من المعادلات الموجودة في الفقرة السابقة والتي تعطي قيم مردودي الضغط الأديباتي أو المتساوي درجة الحرارة.

ويمكن حساب الاستطاعة الفعلية بالحصان أو (KW) من البطاقة الاسمية الخاصة بالضاغط والموجودة على اسطوانة الضاغط أو على محور الضاغط، أو يمكن أن تكون استطاعة الدخل الفعلية لحرك وحدة القيادة الكهربائية، ويجب الانتباه إلى تحديد الأساس الذي حددنا وفقه الاستطاعة الفعلية.

أداء المروحة

تعتبر المروحة ضاغطاً ولكن مع إهمال التغير في كثافة الغاز قبل وبعد المروحة.

تعاريف

الهواء النظامي: الهواء عند الدرجة 68 °F وضغط 29.92 in HG، 5 % رطوبة نسبية، عندها ستكون كثافته 0.07488 lb/ft³ وبحجم نوعي 13.3 ft³/lb وتعتبر هذه الشروط هي المرجع التي يتم وفقها قياس أداء المروحة.

السعة: هي الحجم Q المسحوب من المروحة ويقدر بالقدم المكعب بالدقيقة (أو m^3/min).

فرق الضغط ($head$): وهو الفرق بين الضغط على جانبي المروحة (طرف دخول الهواء للمروحة وطرف خروج الهواء من المروحة)، ويعبر عنه بارتفاع عمود المائع بالقدم (متر) أو إنش (مليمتر) ماء، أو بالباوند لكل إنش مربع h''_w (الكيلو باسكال)، الخ.

ويمكن إعطاء معادلات التحويل بين وحدات الضغط المعبرة عن فرق الضغط كما يلي:

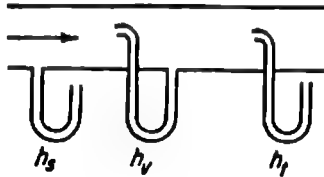
$$h_f = \frac{h''_w \bar{w}_w}{12 \bar{w}_f} \quad ft(m) fluid$$

$$h_f = 69.5 h''_w \quad ft(m) std air$$

$$\text{الضغط} = \frac{h''_w}{27.7} \quad psi(kPa)$$

فرق الضغط الستاتيكي والضغط الناتج عن السرعة وفرق الضغط الكلي

كما هو مبين بالشكل 8.7 فإنه يمكن قراءة ثلاثة أنواع من الضغوط داخل مجرى الهواء بعد المروحة، ويمكن الحصول على قراءة الضغط مباشرة من الضغط الستاتيكي h_s ، كما ويمكن الحصول على الضغط الناتج عن السرعة h_v من تدفق الغاز داخل المجرى والذي يجب تحديده كقيمة متوسطة مأخوذة من الأنبوب المواجه لحركة الهواء.



الشكل 8.7

وبالتالي يمكن إيجاد فرق الضغط الكلي وفق العلاقة:

$$h_t = h_s + h_v$$

ونستطيع إيجاد التحويل عبر تطبيق العلاقة:

$$Velocity = \sqrt{2g_c h_v} \quad \text{ft/s (m/s)}$$

وبإضافة التحويل نجد أن:

$$h_t = \frac{h''_w \bar{W}_w}{12 \bar{W}_f} \quad \text{ft(m) fluid}$$

$$Velocity = 1096.2 \sqrt{\frac{h''_w}{W_f}} \quad \text{ft/min (m/min)}$$

وإذا تم استخدام شروط الهواء النظامي فإننا سنحصل على العلاقة التالية للسرعة:

$$Velocity = 4005 \sqrt{h''_w} \quad \text{ft/min (m/min)}$$

يعتمد أداء المروحة بشكل رئيسي على فرق الضغط الستاتيكي و فرق الضغط الكلي، وستكون هذه الصيغة أكثر واقعية لأنها الصيغة الوحيدة لفرق الضغط التي يمكن استخدامها للتعبير عن مقاومة النظام.

استطاعة المروحة

تعطى الاستطاعة النظرية بالعلاقة التالية:

$$\text{Air hp (kW)} = \frac{Q h''_w}{6355}$$

يمكن استخدام فرق الضغط الستاتيكي أو الكلي في هذه العلاقة، ويعطيان قيمتين للاستطاعة، وستكون القيمة الأخيرة هي الأكبر.

استطاعة المحور (Shp)

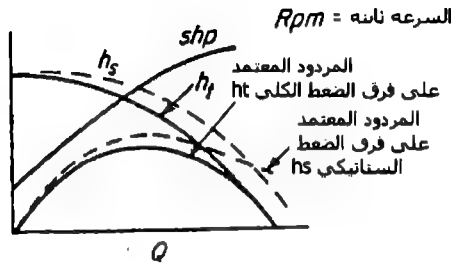
تقاس استطاعة محور دخل أو قيادة المروحة بواسطة مقياس دينامومتر مناسب، ويُحدّد مردود المروحة بالعلاقة:

$$\text{Fan eff, \%} = \frac{\text{air hp}}{\text{shp}} \times 100$$

وتتبع هذه القيمة فرق الضغط المستخدم هل هو ستاتيكي أم كلي.

الصفات المميزة للمروحة

تعمل المروحة - مثل باقي الآلات المسرّعة للموائع - وفق منحنيات مميزة، ويبين الشكل التالي (8.8) مجموعة من المنحنيات المميزة لمروحة نموذجية. وتكون هذه المنحنيات محددة بدقة لكل مروحة ويجب أن تعمل المروحة وفق إحدى نقاط هذه المنحنيات المميزة.



الشكل 8.8

قوانين المروحة

انظر الفصل السابع الحاوي لهذه القوانين.

مميزات الأداء للآلات المكبسية

الضغط الفعال الوسطي

إن من المناسب عند قياس أداء الآلات الحاوية على اسطوانات ومكابس استخدام الضغط الفعال الوسطي، ويعرف الضغط الفعال الوسطي - كما هو مبين بالشكل 8.9 - على أنه الفرق في الضغط على جانبي المكبس، حيث يؤدي هذا الفرق إلى تحريك المكبس في المحركات، أو يقاوم حركة المكبس في المضخات، والذي يمكن تحديده كما يلي:

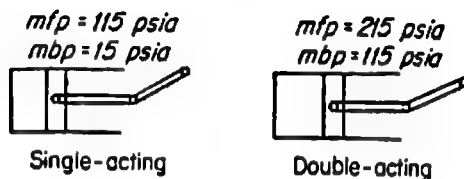
الضغط الفعال الوسطي (mep) = الضغط الوسطي أمام المكبس (mfp) — الضغط الوسطي خلف المكبس (mbp).

لذلك فإنه ومن أجل المكبس أحادي الفعل أو ثنائي الفعل المبينان في الشكل 8.9 فإن الضغط الفعال الوسطي هو نفسه في الحالتين (100 psi) وذلك لأنه يمكننا حسابه في المكبس الأول كما يلي:

$$mep = 115 - 15 = 100 \text{ psi}$$

ومن أجل المكبس الثاني:

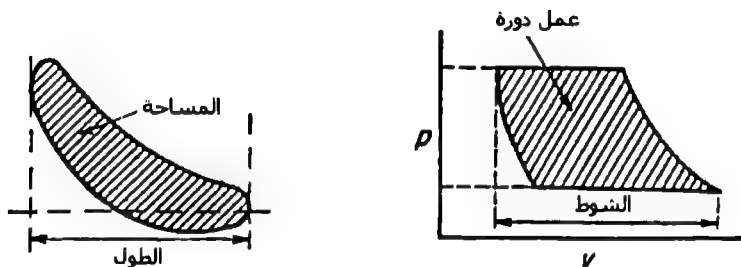
$$mep = 215 - 115 = 100 \text{ psi (kPa)}$$



الشكل 8.9

تعتبر قيم هذه الضغوط وسطية وأنها ثابتة على كامل الشوط، ويمكن حسابها تحت شروط دورية نظرية عبر استخدام طرق الترموديناميك وميكانيك الموائع. وهكذا فإن مساحة المخطط P-V المبينة في الشكل 8.10 تمثل العمل اللازم لدورة واحدة، ويعبر عنه بالقدم - باوند. إذا تم تقسيم تلك المساحة على كامل طول المخطط، والتي تعني وفق الشوط أو الإزاحة فإننا سنحصل على ارتفاع شاقولي للمستطيلات المثلثة لتلك المساحات، يمثل هذا الارتفاع الضغط الفعال الوسطي (mep) كما يلي:

$$mep = \frac{\text{عمل دورة, ft.lb}}{\text{الإزاحة, ft}^3 \times 144 \text{ in}^2 / \text{ft}^2} = \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$



الشكل 8.11

الشكل 8.10

ويُحدّد الضغط الفعّال الوسطي الحقيقي من المساحات البلازيمترية لبطاقة المؤشر مقسومة على الطول ومضروبة بمقياس النابض، ولذلك يمكننا كتابة المعادلة التالية ووفق الشكل 8.11:

$$mep = \frac{\text{area, in}^2}{\text{length in}} \times \text{spring scale, lb/(in}^2 \cdot \text{in)}$$

الاستطاعة الظاهرية

يستخدم الضغط الفعّال الوسطي لحساب الاستطاعة الظاهرية كما يلي:

$$\text{Indicated hp} = mep \frac{Lan}{33,000}$$

ونحصل على المتغيرين a و L مباشرة من قطر الاسطوانة وطول الشوط. وتعتمد عدد الدورات الكاملة في الدقيقة على تركيب أو تصميم آلية الحركة. ونعني بذلك، أحادي أو ثنائي الفعل، عدد الاسطوانات، وعدد الأشواط أو الدورات اللازمة لإكمال دورة ترموديناميكية كاملة.

استطاعة المحور أو الكبج

تعطى استطاعة المحور أو الكبج والمقاسة بالدينامومتر أو بمكبج Prony بالعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} hp &= \frac{2\pi LFN}{33,000} \\ &= \frac{LFN}{5250} \end{aligned}$$

ضغط الكبج الفعال الوسطي أو ضغط الكبج الوسطي

إن من غير الممكن أخذ معلومات من البطاقات الاسمية للمحركات أو الضواغط ذات السرعة العالية، ولكن تؤخذ قراءة استطاعة الكبج ((brake horsepower (bhp) والتي يعبر عنها بضغط الكبج الوسطي المكافئ، بالموافقة والمساواة بين المعادلتين السابقتين أو:

$$\text{Brake mean pressure, psi (kPa)} = \frac{bhp}{Lan} \times 33,000$$

ضغوط الاحتكاك الوسطية

يقيس ضغط الاحتكاك الوسطي الضياعات بين الاسطوانات والمحاور:

ففي المحركات: ضغط الاحتكاك الوسطي، psi (kPa) = الضغط الفعال الوسطي المؤشر - ضغط الكبج الوسطي.

وفي الضواغط أو المضخات:

ضغط الاحتكاك الوسطي، psi (kPa) = ضغط الكبج الوسطي - الضغط الوسطي المؤشر.

الردود الميكانيكي

يعتبر الردود الميكانيكي طريقة أخرى للتعبير عن الضياعات بين الاسطوانة والمحور: ففي المحركات:

$$\text{Mechanical eff} = \frac{bhp}{\text{indicated hp}} \times 100$$

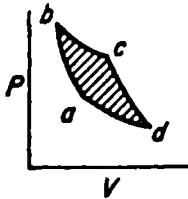
وفي الضواغط أو المضخات:

$$\text{Mechanical eff} = \frac{\text{indicated hp}}{\text{bhp}} \times 100$$

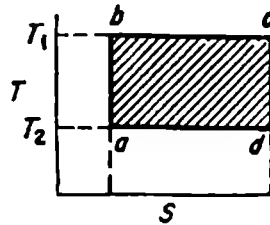
الدارات الحرارية للمحرك - النظرية

دائرة كارنو (Carnot)

يعطى المردود الحراري الأعظمي لتحويل الحرارة إلى عمل من قبل دائرة كارنو (الشكل 8.12)، ويكون هذا المردود مستقلاً عن خواص الوسيط العامل ويحدد كما يلي:



الشكل 8.13



الشكل 8.12

$$\begin{aligned} \text{المردود الحراري} &= \frac{\text{العمل المنجز}}{\text{الحرارة المضافة}} \\ &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \end{aligned}$$

يعتمد الضغط الفعّال الوسيط لدائرة كارنو على خواص الوسيط العامل، ومن أجل غاز معين (الشكل 8.13) لدينا:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v} \right)^{k-1}$$

ويظهر الشكل 8.14 نتائج تطبيق هذه المعادلة على دائرة كارنو، باستخدام الهواء كوسيط عمل ($k=1.4$). ويعطى عمل الدارة بالعلاقة التالية حيث تملك الرموز نفس مدلولها في الشكل 8.13:

$$\Delta W_{\text{cycle}} = (T_2 - T_1) \frac{WR}{J} \ln \frac{v_c}{v_b}$$

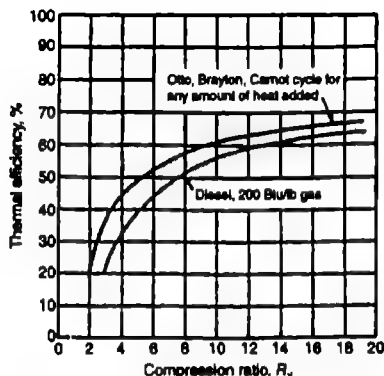
و

$$\text{mep} = \frac{(T_2 - T_1) WR \ln(v_c / v_b)}{v_d - v_b}$$

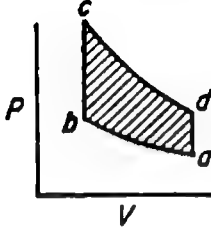
ومن أجل البخار الرطب مثل بخار الماء (الشكل 8.15):

$$\text{mep} = \frac{W_{\text{cycle}}}{v_d - v_b}$$

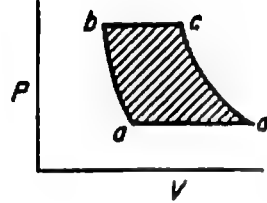
$$W_{\text{cycle}} = \text{area } abcd$$



الشكل 8.14



الشكل 8.16



الشكل 8.15

دائرة اوتو (Otto)

تعتبر هذه الدائرة هي الدائرة الأساسية المستخدمة في المحركات البترولية أو محركات المزج الأخرى (الشكل 8.16) ويعطى المردود الحراري بالعلاقة:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v} \right)^{k-1}$$

ولقد تم إظهار القيم بيانياً من أجل الهواء في الشكل 8.15.

$$\text{Work, ft.lb} = JQ_{\text{added}} \times \text{thermal eff}$$

$$\text{mep, psi} = \frac{\text{work}}{144(v_a - v_b)}$$

حيث وضعت الأدلة بما يتوافق مع الشكل 8.16.

دائرة ديزل (Diesel)

تعتبر هذه الدائرة هي الدائرة الأساسية لمحركات الاحتراق الداخلي ذات الحقن (الشكل 8.17)، ويعطى المردود الحراري لها كما يلي:

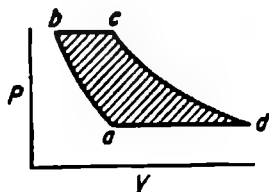
$$\text{Thermal eff} = 1 - \frac{1}{(v_a/v_b)^{k-1}} \frac{(v_c/v_d)^k - 1}{K(v_c/v_d - 1)}$$

وبين الشكل 8.15 هذه القيم من أجل هواء نظامي.

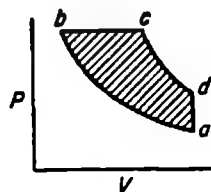
$$\text{Work} = J[WC_p(T_c - T_b) - WC_v(T_d - T_a)]$$

$$\text{mep} = \frac{\text{work}}{v_a - v_b}$$

كما يمكن تقدير الحرارة التي يمكن استردادها من غازات العادم بالعلاقة التالية:



الشكل 8.18



الشكل 8.17

$$Q = \text{shp } C \frac{\Delta T}{4}$$

دائرة برايتون (Brayton)

تستخدم هذه الدائرة للتعبير عن منشآت طاقة العنفات الغازية (الشكل 8.18)، ويعطى المردود الحراري لها بالعلاقة:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v} \right)^{k-1}$$

وتؤخذ المعطيات بياناً من الشكل 8.15 ومن أجل الهواء النظامي. حيث يعطى العمل والضغط الفعال المتوسط بالعلاقين:

$$\text{Work} = WC_p J (T_c - T_b - T_d + T_a)$$

$$\text{mep} = \frac{\text{work}}{v_d - v_b}$$

دائرة رانكين (Rankine)

يتم إيجاد قيم الدائرة النظرية الحاوية على البخار مثل بخار الماء، فقط من أجل خواص فيزيائية حقيقية للمائع، كتلك المعطاة في جداول بخار الماء ومخططات موليير (Mollier)، وبحسب العمل المحرك الأساسي ΔW_{pm} لمعادلة القدرة العامة كما هو مبين بالشكلين 8.19 و 8.20 والذي يساوي:

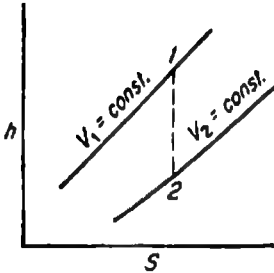
$$\Delta W_{pm} = h_1 - h_2 \quad \text{Btu/lb (kJ/kg)}$$

حيث

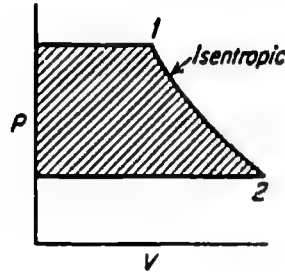
h_1 = انثالبي الصمام الخانق، Btu/lb.

h_2 = انثالبي غازات العادم (عند نفس الانتروبي للقيمة h_1)، Btu/lb.

ويعطى معدّل الماء أو معدّل بخار الماء بالعلاقة:



الشكل 8.20



الشكل 8.19

$$\begin{aligned} \text{Water rate} &= \frac{3412.75}{\Delta W_{pm}} \quad \text{lb/kWh} \\ &= \frac{344.1}{\Delta W_{pm}} \end{aligned}$$

حيث يمثل ΔW_{fp} عمل مضخة التزويد المطلوب لإيصال الماء إلى المرحل (الشكل 8.21) ويعطى بالعلاقة:

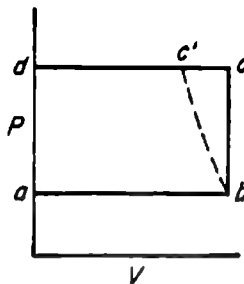
$$\Delta W_{fp} = h_c - h_b \quad \text{Btu/lb (kJ/kg)}$$

حيث

h_b = انثالي السائل الداخل إلى المضخة، Btu/lb (kJ/kg).

h_c = انثالي السائل الخارج من المضخة (وله نفس الانتروبي للقيمة h_b)، Btu/lb (kJ/kg).

إذا كان الماء غير قابل للانضغاط عندها ستنتطبق النقطة c' على النقطة c في الشكل 8.21 ويكون لدينا:



الشكل 8.21

$$\text{Btu/lb} = \frac{\Delta p \times 144 \times \bar{v}}{778} = \frac{\text{head on pump}}{778}$$

$$\Delta W_{net} = \Delta W_{pm} - \Delta W_{fp} \quad \text{Btu/lb (kJ/kg) عمل الدارة الصافي}$$

$$= \Delta Q_{added} \quad \text{كمية الحرارة المضافة لإنتاج بخار الماء}$$

$$= h_1 - h_{2liq} - \Delta W_{fp} \quad \text{(Btu/lb) (kJ/kg)}$$

حيث

$$h_{2liq} = \text{انثالي السائل المشبع عند مخرج الناقل الأساسي.}$$

$$\begin{aligned} \text{المردود الحراري لدارة رانكين} &= \frac{\Delta W_{net}}{\Delta Q_{added}} \\ &= \frac{h_1 - h_2 - \Delta W_{fp}}{h_1 - h_{2liq} - \Delta W_{fp}} \end{aligned}$$

ستصبح ΔW_{fp} دارات الضغط المنخفض صغيرة ويمكن إهمالها وبالتالي سنحصل على ما يلي:

$$\text{المردود الحراري لدارة رانكين} \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2liq}}$$

$$\text{معدل كمية الحرارة المزودة لدارة رانكين} \quad \text{Btu/kWh supplied} = \frac{3412.75}{\text{thermal eff}}$$

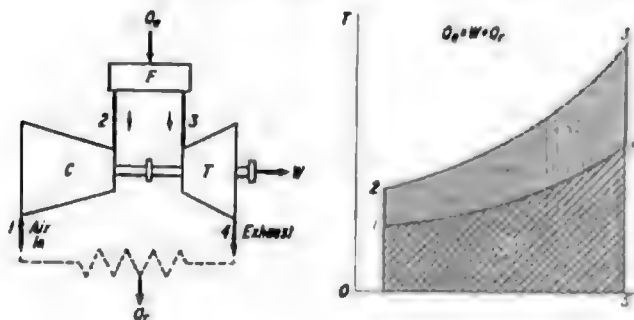
المسعر الخانق (THROTTLING CALORIMETER)

يعمل المسعر الخانق والمستخدم لقياس انثالي البخار الرطب وفق أساس توسع متساوي الانثالي من شروط خط الضغط العالي إلى الضغط ضمن غرفة المسعر. ولإيجاد الحلول البيانية عليك استخدام مخطط مولير (Mollier) والموجود في معظم مراجع الهندسة الميكانيكية، حيث يكون فيها:

$$h_{\text{calorimeter chamber}} = h_{\text{high-pressure line}}$$

العتقات الغازية

يبين الشكل 8.22 و 8.23 مخططاً لعنفه غازية بسيطة ذات دائرة مفتوحة والمخطط T - S لها، كما يعطي الشكل معادلات العمل للضاغط، غرفة الاحتراق، والعنفه، كما يبين الشكل أيضاً المخططات P - V لكل عنصر من الدارة.



الشكل 8.22

وكل الاختصارات والرموز المستخدمة في الشكل 8.23 معطاة في الجدول 8.2. وسنورد الآن مختلف المعادلات المثلة لعنفه غازية بسيطة ذات دائرة مفتوحة:

$$T_2 = T_1 P_r^{(k-1)/k}$$

$$W_c = c_p (T_2 - T_1)$$

$$Q_a = c_p (T_3 - T_2)$$

$$T_4 = \frac{T_3}{P_r^{(k-1)/k}}$$

$$W_t = c_p (T_3 - T_4)$$

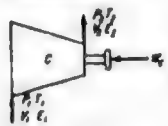

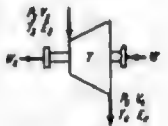



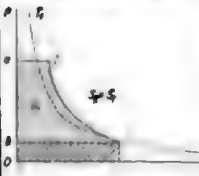
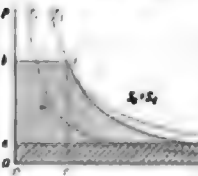
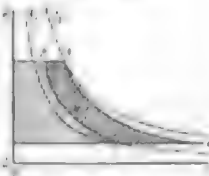
$$\text{thermal eff} = \frac{W}{Q_a} = \frac{W_t - W_c}{Q_a}$$

$$\text{Thermal eff} = 1 - \frac{1}{P_r^{(k-1)/k}}$$

$$T_{\text{Energy in exhaust}} = c_p(T_4 - T_1) \quad \text{Btu/lb air}$$

$$Q_r = Q_a - W$$

$$P_3 = P_1 P_r$$

<p style="text-align: center;">COMPRESSOR</p>  <p>(1) $\frac{P_2 V_2}{J} = E_2 = W_c + \frac{P_1 V_1}{J} + E_1$</p> <p>(2) $H_2 = H_1 + W_c$</p> <p>(3) $W_c = H_2 - H_1$</p> <p>(4) $W_c = c_p(T_2 - T_1)$</p>	<p style="text-align: center;">COMBUSTOR</p>  <p>(5) $\frac{P_3 V_3}{J} = E_3 + Q_4 + \frac{P_2 V_2}{J} + E_2$</p> <p>(6) $H_3 = Q_4 + H_2$</p> <p>(7) $Q_4 = H_3 - H_2$</p> <p>(8) $Q_4 = c_p(T_3 - T_2)$</p>	<p style="text-align: center;">TURBINE</p>  <p>(9) $\frac{P_4 V_4}{J} = E_4 + \frac{P_3 V_3}{J} + E_3 + W$</p> <p>(10) $H_4 = H_3 + W$</p> <p>(11) $W = H_3 - H_4$</p> <p>(12) $W = H_3 - H_4 = H_3 - H_4 + c_p(T_3 - T_4 + T_2 - T_1)$</p>
<p style="text-align: center;">HEAT REJECTED</p>  <p>(13) $\frac{P_2 V_2}{J} + E_2 = \frac{P_1 V_1}{J} + E_1 + Q_r$</p> <p>(14) $H_2 = H_1 + Q_r$</p> <p>(15) $Q_r = H_2 - H_1$</p> <p>(16) $Q_r = c_p(T_2 - T_1)$</p>	<p style="text-align: center;">CYCLE</p>  <p>(17) $Q_4 = W + Q_r$</p> <p>(18) $W = Q_4 - Q_r = H_3 - H_2 - (H_4 - H_1)$</p> <p>(19) $W = c_p(T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$</p>	<p style="text-align: center;">ENERGY FLOW</p>  <p>(20) Thermal efficiency = $\frac{W}{Q_4}$</p> <p>(21) $\frac{c_p(T_3 - T_2 - T_4 + T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$</p> <p>(22) $1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$</p>
<p style="text-align: center;">COMPRESSOR WORK</p>  <p>$W_c = \frac{P_2 V_2}{J} - \frac{P_1 V_1}{J} + E_2 - E_1$</p>	<p style="text-align: center;">TURBINE WORK</p>  <p>$W_t = \frac{P_3 V_3}{J} - \frac{P_4 V_4}{J} + E_3 - E_4$</p>	<p style="text-align: center;">WORK OUTPUT</p>  <p>$W = W_t - W_c$</p>

الجدول 8.2 الاختصارات والرموز المستخدمة في الشكل 8.23

a = التسارع، ft/s^2 .

A = المساحة، ft^2 .

bdc = المركز الميت السفلي.

$bhphr$ = استطاعة الكبش - ساعة.

$bmeP$ = ضغط الكبش الفعال الوسطي.

$bsfc$ = استهلاك الوقود النوعي الكبش.

Btu = وحدة حرارية بريطانية.

c = خلوص الضاغط المثوي.

C = الحرارة النوعية، Btu/lb .

C_a = الحرارة النوعية البوليتروبية، Btu/lb .

C_b = الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت، Btu/lb .

C_v = الحرارة النوعية تحت حجم ثابت، Btu/lb .

C = ذرة الكربون.

C_d = معامل فوهة التصريف.

C_v = معامل سرعة الفوهة.

CO = رمز أول أكسيد الكربون.

CO_2 = رمز ثاني أكسيد الكربون.

COP = معامل الأداء.

d - بعد، ft.

D - كثافة الغاز، lb/ft³.

e - المردود الحراري للدارة.

e_b - مردود المرجل، (مولّد البخار).

e_c - مردود الضاغط.

e_e - مردود المحرك.

e_n - مردود الفوهة.

e_r - فعالية المبادل.

e_s - مردود المرحلة.

e_t - المردود الحراري.

e_v - المردود الحجمي للضاغط.

e_D - مردود الرذاذات.

e_N - مردود الفوهة.

E - الطاقة الداخلية، Btu/lb.

E_k - الطاقة الحركية، Btu أو ft.lb/lb.

E_p - الطاقة الكامنة، ft.lb/lb.

F - القوة، lb (= ma).

F - درجة الحرارة، بالدرجات فهرنهايت.

g - تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s².

h_f - انثالي السائل، Btu/lb.

h_{fg} - انثالي التبخر، Btu/lb.

h_v - انثالي البخار، Btu/lb.

$h-p$ - الضغط العالي.

H - الانثالي، Btu أو ft.lb/lb.

H - ذرة الهيدروجين.

H_s - انثالي الركود، Btu/lb.

$H_1 + E_{k1} =$

H_2O - الرمز الكيميائي للماء أو لبخار الماء.

HHV - قيمة كمية الحرارة العليا، Btu/lb.

HR - معدل كمية الحرارة، Btu/Kwhr.

lhp - الاستطاعة الظاهرية.

$J = 778.26 \text{ ft.lb/Btu}$

in. Hg abs - إنش زئبق مطلق.

$k = \text{نسبة الحرارة النوعية} = \frac{C_p}{C_v}$

KE - الطاقة الحركية، ft.lb أو Btu/lb.

$kwhr$ - كيلو واط ساعي = 3412.75 Btu.

\log_e - اللوغاريتم ذو الأساس e.

$l-p$ - ضغط منخفض.

L = طول شوط المكبس، ft.

m = الكتلة - W/g.

m = تدفق نرف الهواء، ليبرة لكل ليبرة تدفق بخار ماء من الفوهة.

M = المادة.

M = رقم ماخ.

M = الوزن المولي.

n = ثابت العملية البوليتروبية.

N = عدد العناصر الكلي.

O = رمز الأوكسجين.

psf = ضغط lb/ft².

psfa = مطلق lb/ft².

psfg = مقاس lb/ft².

psi = lb/in².

psia = مطلق lb/in².

psig = مقاس lb/in².

P = الضغط psi, psf, psia, psig, psfa, psfg

P_e = ضغط الفوهة الخرج، psia, psfa.

P_m = الضغط الفعّال الوسطي، psi, psf.

P_s = ضغط الركود، spia, psfa.

P_r - نسبة الضغط.

P_r - الضغط المحفّض.

Q - كمية الحرارة المنقولة، Btu/lb.

Q_c - كمية الحرارة المضافة للدائرة، Btu/lb.

Q_r - كمية الحرارة المطروحة من الدائرة، Btu/lb.

R - ثابت الغاز.

R - درجة الحرارة المطلقة، درجة رانكين Rankine.

R_u - ثابت الغازات العام = 1545.

RF - عامل إعادة التسخين.

\overline{RH} - الرطوبة النسبية، بالمئة.

s - مسافة أو طول، ft.

s_f - انتروبي السائل، Btu/lb.°F.

s_{fg} - زيادة الانتروبي عند التحول من سائل مشبع إلى بخار Btu/lb.°F.

s_v - انتروبي البخار، Btu/lb.°F.

S - الانتروبي، Btu/lb.°F.

S - ذرة الكبريت.

\overline{SH} - الرطوبة النوعية، لبيرة بخار لكل لبيرة غاز جاف.

SR - تدفق بخار الماء lb/Kwhr.

t - درجة الحرارة، °F.

$$t = \text{الزمن، s.}$$

$$tdc = \text{المركز الميت السفلي.}$$

$$T = \text{درجة الحرارة المطلقة، } ^\circ R.$$

$$T_c = \text{درجة الحرارة الحرجة للنفو، } ^\circ R.$$

$$T_s = \text{درجة حرارة الركود، } ^\circ R.$$

$$T_r = \text{درجة حرارة المستقبل، } ^\circ F.$$

$$T_r = \text{درجة الحرارة المخفضة.}$$

$$T_s = \text{درجة حرارة المنبع.}$$

$$\overline{TH} = \text{كمية الحرارة الكلية (Btu) لكل ليبرة من المزيج.}$$

$$u = \text{السرعة، (ft/s)، fps.}$$

$$v = \text{السرعة، (ft/s)، fps.}$$

$$v_f = \text{الحجم النوعي للسائل المشبع، ft}^3/\text{lb.}$$

$$v_{fg} = \text{زيادة الحجم النوعي لانتقال السائل المشبع إلى بخار، ft}^3/\text{lb.}$$

$$v_g = \text{الحجم النوعي للبخار، ft}^3/\text{lb.}$$

$$V = \text{الحجم النوعي، ft}^3/\text{lb.}$$

$$V_c = \text{حجم الخلوص، ft}^3.$$

$$V_d = \text{الحجم المزاح، ft}^3.$$

$$V_M = \text{حجم المول، ft}^3.$$

$$V_r = \text{نسبة الانضغاط، } \frac{V_1}{V_2}.$$

V_r = الحجم المخفض.

v_r = الحجم الكلي، ft^3 .

w = وزن الكتلة، lb.

W = العمل الميكانيكي $ft.lb$ أو Btu/lb .

W_e = خرج العمل المحرك، Btu أو $ft.lb/lb$.

W_f = عمل التدفق، $ft.lb$ أو Btu/lb .

W_H = العمل في اسطوانات الضغط العالي، $ft.lb$ أو Btu/lb .

W_L = العمل في اسطوانات الضغط المنخفض، $ft.lb$ أو Btu/lb .

W_o = ليبرة أو كسجين لكل ليبرة وقود.

W_p = العمل الداخلي للمضخة، Btu أو $ft.lb/lb$.

z = النسبة المئوية للحدودة.

y = النسبة المئوية للرطوبة.

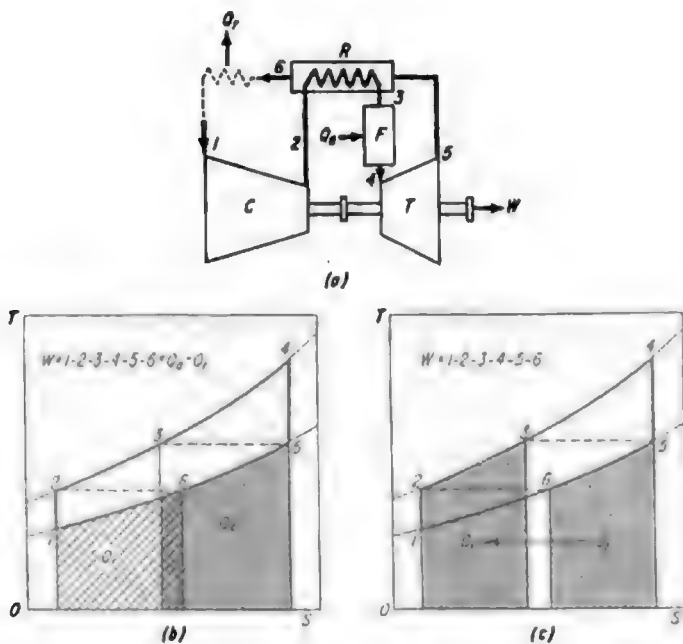
Z = عامل قابلية الانضغاط.

يظهر الشكل 8.25 دائرة عنفة غازية مع استرجاع حراري، وتعطى معادلات الأداء لهذا النوع من العنفات كما يلي:

$$Q_1 = c_p (T_5 - T_6) = c_p (T_3 - T_2) \text{ Btu/lb air}$$

$$Q_2 = c_p (T_4 - T_3)$$

$$W_t = c_p (T_4 - T_3)$$



الشكل 8.25

$$e_t = \frac{W}{Q_a} = \frac{W_t - W_c}{Q_a}$$

$$e_t = 1 - \frac{T_1}{T_4} P_r^{(k-1)/k}$$

$$Q_r = Q_a - W$$

$$P_4 = P_1 P_r$$

9

معادلات هندسة الطاقة

عوامل أداء منشآت الطاقة

يُعرف معدّل كمية الحرارة للأداء الحراري الكلي كما يلي:

$$\text{معدّل كمية الحرارة Btu/kWh} = \frac{\text{كمية الحرارة المخزنة بالوقود خلال مدة، Btu}}{\text{الطاقة المستخرجة خلال نفس الفترة، kWh}}$$

$$(Btu/kWh \times 2.33 = kJ/kWh)$$

$$100 \times \frac{3412.75}{\text{كمية الحرارة}} = \% \text{ المردود الحراري،}$$

$$100 \times \frac{\text{متوسط الحمل خلال فترة، kW}}{\text{الاستطاعة المحددة، kW}} = \% \text{ عامل الاستطاعة،}$$

$$100 \times \frac{\text{متوسط الحمل خلال فترة، kW}}{\text{حمولة الذروة خلال نفس الفترة، kW}} = \% \text{ عامل التحميل،}$$

أداء مولد البخار (المرجل)

رموز واصطلاحات

h_{steam} = انثالي الوحدة الخارجة من مولّد البخار (خرج المحمّص)، Btu/lb (kJ/Kg).

$h_{\text{feedwater}}$ = انثالي ماء التزويد الداخل لمولّد البخار (دخل الموقر)، Btu/lb (kJ/Kg).

W_m = نسبة الرطوبة في الوقود، lb/lb (Kg/Kg).

t_{fuel} = درجة حرارة الوقود، °F (°C).

t_{fg} = درجة حرارة غاز المدخنة، °F (°C).

H_2 - ليبرة هيدروجين في كل ليبرة وقود، يؤخذ من التحاليل المجرأة على الوقود (Kg/Kg).

W_{da} - وزن هواء التزويد الجاف، (Kg/Kg) lb/lb fuel.

W_w - وزن بخار الماء لكل ليبرة هواء جاف (Kg/Kg).

t_a = درجة حرارة المحيط، أو درجة حرارة الهواء الداخِل إلى مسخِّن الهواء، (°C) °F.

W_{dg} - وزن غازات الوقود الجافة، (Kg/Kg) lb/lb fuel.

C - ليبرة كربون في كل ليبرة وقود، ويؤخذ من التحاليل المجرأة على الغاز (Kg/Kg).

CO - نسبة غاز CO في غازات العادم، يؤخذ كنسبة مئوية وعلى أساس الحجم الجاف.

CO_2 - نسبة غاز CO_2 في غازات العادم، يؤخذ كنسبة مئوية وعلى أساس الحجم الجاف.

refuse - ليبرة نفايات (مخلفات) لكل ليبرة وقود، وهي المحترقة في فرن مولّد البخار (Kg/Kg).

ash - ليبرة رماد لكل ليبرة وقود، وتؤخذ من التحاليل المجرأة على الوقود (Kg/Kg).

كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء

$$\Delta Q = h_{steam} - h_{feedwater} \quad \text{Btu/lb (kJ/kg)}$$

وإذا كان لدينا محمّصاً للبخار فعندها يجب أن نضيف كمية الحرارة المضافة للتحميص إلى كمية الحرارة المضافة وهي:

$$h_{reheat} = h_{leaving reheat} - h_{entering reheat}$$

قدرة مولد البخار وكمية البخار الناتج

يستخدم مصطلح استطاعة المولّد المطوّرة (developed boiler horsepower) - في نماذج مولّدات البخار الصغيرة - لقياس خرج مولّد البخار، أو كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء. والتي تعرّف على أنّها كمية الحرارة اللازمة لتبخير 34.5 ليبرة (15.7 Kg) من الماء اعتباراً من الدرجة 212 °F (100 °C).

لذلك:

$$\text{استطاعة المولد المطوّرة} = 34.5 \times 970.4 = 33,479 \text{ Btu/h (9.8 KW)}$$

وتعرّف استطاعة المولّد المقدرة كما يلي:

$$\text{سطح تسخين } (0.920 \text{ m}^2) \times 10 \text{ ft}^2 = \text{استطاعة المولد المقدرة}$$

بالتالي

$$\text{النسبة المثوية المقدرة} = 100 \times \frac{\text{استطاعة المولد المطوّرة}}{\text{استطاعة المولد المقدرة}}$$

عامل التبخير (FE)

$$\text{FE} = \frac{\text{كمية الحرارة الفعلية الممتصة لتحويل الماء إلى بخار}}{\text{كمية الحرارة الكامنة للبخار اعتباراً من الدرجة 212°F (100°C)}} \\ = (h_{\text{steam}} - h_{\text{feedwater}}) / 970.4 \text{ (2262 kJ/kg)}$$

التبخير

التبخير الفعلي AE، ليبرة بخار ماء لكل ليبرة وقود (Kg/Kg)

$$= \frac{\text{كمية البخار المولدة lb(kg) خلال فترة}}{\text{كمية الوقود المحروقة lb(kg) خلال نفس الفترة}}$$

التبخير المكافئ EE، ليبرة بخار ماء لكل ليبرة وقود (Kg/Kg) اعتباراً من الدرجة 212 °F (100 °C).

$$= \text{البخير الفعلي AE} \times \text{عامل التبخير الفعلي FE}$$

$$= \text{FE} \times \text{AE}$$

مردود مولد البخار

$$\text{مردود مولد البخار} = \frac{\text{كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء خلال فترة، Btu(kJ)}}{\text{كمية الحرارة الموجودة في الوقود خلال نفس الفترة، Btu(KJ)}}$$

تعرف كمية الحرارة الموجودة في الوقود على أنها أعلى قيمة لكمية الحرارة البدائية المخزنة في الوقود وفق أساسيات الاحتراق.

الضیاعات وتوازن كمية الحرارة

إن من الممكن وعبر تطبيق القانون الأول في الترموديناميك إيجاد جميع كميات الحرارة الموجودة ضمن الوقود عبر إضافة جميع الضیاعات إلى كمية الحرارة المضافة لبخار الماء.

الضیاعات الناتجة عن وجود الرطوبة في الوقود

$$= W_m (1090.7 - t_{\text{fuel}} + 0.455 t_{\text{fg}}) \quad \text{Btu/fuel}$$

حيث

$$\text{Btu/lb} \times 2.33 = \text{kJ/Kg}$$

الضياعات الناتجة عن احتراق الهيدروجين إلى بخار ماء بدلاً من سائل.

$$= 9 \times H_2 (1090.7 - t_{fuel} + 0.455 t_{fg}) \quad \text{Btu/lb fuel}$$

حيث

H_2 = ليبرة هيدروجين لكل ليبرة وقود، وتؤخذ من التحاليل الجحرة على الوقوج
(Kg/Kg).

الضياعات الناتجة عن الرطوبة في الهواء.

$$= W_{aa} \times W_w \times 0.47 (t_{fg} - t_a) \quad \text{Btu/lb fuel}$$

الضياعات الناتجة عن غازات العادم الجافة = $0.24 W_{dg} (t_{fg} - t_a)$

مولدات البخار

يتم حساب مردود مولد البخار باستخدام المعادلات التالية (انظر الشكل 9.1):

$$\text{المردود الكلي لمولد البخار} = \frac{\text{الخرج ، Btu/h}}{\text{الدخل ، Btu/h}}$$

$$\text{الخرج ، Btu/h} = S(h_g - h_{f1}) + S_r (h_{g3}/h_{g2}) + B (h_{f3} - h_{f1})$$

حيث

$$S = \text{تدفق بخار الماء ، lb/h}$$

$$S_r = \text{تدفق بخار الماء المحمص ، (في حال وجوده) lb/h}$$

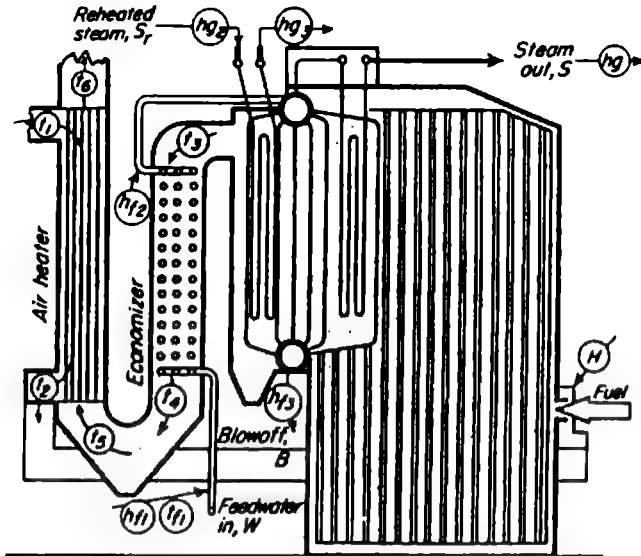
$$B = \text{التصريف ، lb/h}$$

$$\text{الدخل ، Btu/h} = FH$$

حيث

 F = الوقود الداخل، lb/h (المحترق). H = قيمة كمية الحرارة العظمى للوقود Btu/lb المحترق. h_f = انثالي ماء التزويد، Btu/lb. h_g = انثالي بخار الماء المغادر لموّلّد البخار، Btu/lb.

$$\text{مردود الموفر} = \frac{\text{كمية الحرارة الممتصة، Btu/h}}{\text{كمية الحرارة المقدمة، Btu/h}}$$



الشكل 9.1 نقاط قياس درجات الحرارة والانثالي المستخدمة في قياس مردود موّلّد البخار

$$\text{كمية الحرارة الممتصة, Btu/h} = W (h_2 - h_1)$$

حيث

$$W = \text{تدفق ماء التزويد, lb/h}$$

$$\text{كمية الحرارة المقدمة, Btu/h} = H_g F$$

حيث

$$H_g = \text{كمية الحرارة المتوفرة في غاز الوقود, Btu/lb}$$

$$= \text{كمية الحرارة المتوفرة في الغاز الجاف} + \text{كمية الحرارة المتوفرة في بخار غازات العادم, Btu/lb}$$

$$\begin{aligned} &= (t_3 - t_{f1})0.24G + (t_3 - t_{f1})0.46 \left\{ M_f + 8.9H_2 \right. \\ &\quad \left. + M_a \left[G - C_b - N_2 - 7.94 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) \right] \right\} \\ G &= \frac{11CO_2 + 8O_2 + 7(N_2 + CO)}{3(CO_2 + CO)} \times \left(C_b + \frac{S}{2.67} \right) + \frac{S}{1.60} \end{aligned}$$

حيث

$$M_f = \text{ليبرة رطوبة لكل ليبرة وقود محترقة.}$$

$$M_a = \text{ليبرة رطوبة لكل ليبرة هواء جواف داخل لفرن المولد.}$$

$$C_b = \text{ليبرة كربون لكل ليبرة وقود محترقة} = C - R_{gr}$$

$$C_r = \text{ليبرة قابلة للاحتراق لكل ليبرة مخلفات (نفايات).}$$

وسنعتلي الآن عوامل التحويل للمعادلات السابقة:

$$W = \text{Btu/h} \times 0.293$$

$$W = \text{lb/h} \times 0.454 = \text{Kg/h}$$

$$\text{Btu/lb} \times 2.33 = \text{kJ/Kg}$$

$$\text{lb/lb} = \text{Kg/Kg}$$

ويبين الشكل 9.1 السابق النقاط الواجب أخذ درجات حرارتها والانتالي لها واللازمة لحساب مردود مولّد البخار.

$$\text{مردود مسخن الهواء} = \frac{\text{كمية الحرارة الممتصة Btu/lb fuel}}{\text{كمية الحرارة المتوفرة (المقدمة) Btu/lb fuel}}$$

$$\text{كمية الحرارة الممتصة Btu/lb fuel} = A_h (t_2 - t_1) (0.24 + 0.46 M_a)$$

حيث

$$A_h = \text{تدفق الهواء خلال المسخن، وقود lb/lb} = A - A_m$$

$$A = \text{التدفق الكلي للهواء الداخل لفرن المولّد، وقود lb/lb}$$

$$= G - C_b - N_2 - 7.94 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)$$

G = وهو جهاز مشابه للموفر ولكنه يوضع على مخرج الغازات الخارجة من الفرن.

$$A_m = \text{الهواء الخارجي الذي يتم تزويده عبر المروحة أو بمصادر أخرى، وقود lb/lb}$$

$$\text{كمية الحرارة المقدمة Btu/lb fuel} = (t_3 - t_1) 0.24G + (t_3 - t_1) 0.46 (M_f + 8.94 H_2 + M_a A)$$

حيث G كما عرفناه في الموفر أعلاه، و A كما عرفناها سابقاً، ويعتمد كلاهما على خصائص الغاز الداخل إلى مسخن الهواء.

أنواع الوقود والاحتراق

مقدار تسخين الوقود

يمكن إيجاد مقدار تسخين أنواع الوقود الصلبة مثل الفحم الحجري، فحم الكوك، الثقل (لباب قصب السكر) بالعلاقة:

$$Q = 14,500C + 62,000\left(h - \frac{O}{8}\right) + 4000S$$

حيث

Q = مقدار التسخين، Btu/lb (محترقة).

C = نسبة الكربون (طيار وثابت، ويدعى أيضاً بالكربون الكلي) في الوقود، ويعبر عنه كنسبة.

H = نسبة الهيدروجين.

O = نسبة الأوكسجين.

S = نسبة الكبريت في الوقود.

يعبر عن النسب الثلاث السابقة بنسب مئوية، وللتحويل إلى الكيلو جول اضرب قيم Btu بالعدد 1.055.

ويعطى مقدار التسخين للوقود السائل - النفط - بالعلاقة:

$$Q = 13,500C + 60,890H \text{ Btu}$$

حيث تأخذ الرموز نفس دلالاتها السابقة.

عندما تُعرَّف قراءة 'Baume' للوقود السائل. فعندها يُحسب مقدار التسخين وفق العلاقة:

$$Q = 18,650 + 40 (\text{Baumé reading} - 10)$$

كمية الهواء المطلوبة: تعطى كمية الهواء المطلوبة لمختلف أنواع الوقود — الصلب والسائل والغازي — بالعلاقة:

$$\text{lb/lb fuel} = \frac{\text{كمية الهواء المطلوبة}}{1300} \quad \text{Btu/lb, مقدار التسخين الأعظمي للوقود}$$

$$(\text{lb/lb} \times 0.454 = \text{kg/kg})$$

نواتج الاحتراق

تجرى عمليات تحليل لغازات المدخنة لتحديد فعالية عمليات الاحتراق، والتي تكون معطاة سلفاً على أساس حجمي جاف.

إذا كان محتوى الوقود من التروجين قليلاً عندها يحسب الهواء الإضافي الواجب زيادته بالعلاقة:

$$\text{الهواء الزائد المضاف} = \frac{3.78(O_2 - CO/2)}{N_2 - 3.78(O_2 - CO/2)} \times 100 \quad \text{percent}$$

حيث تدل الصيغ O_2 ، N_2 ، CO على النسب المئوية لحجوم هذه الغازات، وتأخذ من تحليل غازات المدخنة، وهناك كميات هواء إضافية يجب أخذها بعين الاعتبار وهي معطاة وفق جداول موجودة في المراجع الهندسية.

العنفات البخارية

توجد هناك أربع قياسات هامة لأداء العنف البخارية وهي معدل بخار ومعدل الحرارة والمردود الحراري ومردود المحرك. ويبين الشكل 9.2 الدارات الأساسية التي يحسب وفقها أداء العنف، وسنقدم الآن المعادلات المستخدمة لحساب هذه القياسات الأربع:

معدل الحرارة

ويعطى لجميع أنواع العنفات وفق العلاقة:

$$\text{معدل البخار , lb/kWh} = \frac{\text{تدفق بخار الماء , lb/h (W}_1\text{)}}{\text{خرج المحور أو المولد , kWh (P)}}$$

ومن أجل عنفات الضغط المعاد:

$$\text{معدل الحرارة , Btu/kWh} = \frac{W_1(h_1 - h')}{P}$$

حيث

h_1 = انتالي البخار الداخل للعنفه، Btu/lb (انظر المخطط)، وعندما يتم خروج بخار الماء (من العنفه) لتتم معالجته فإن:

h' = انتالي الماء الفعلي للبخار المطروح، Btu/lb.

أما عندما يتم خروج بخار الماء إلى الوسط الخارجي عندها:

h' = انتالي الماء المشبع عند الضغط الذي يخرج به البخار من العنفه، Btu/lb (انظر المخطط).

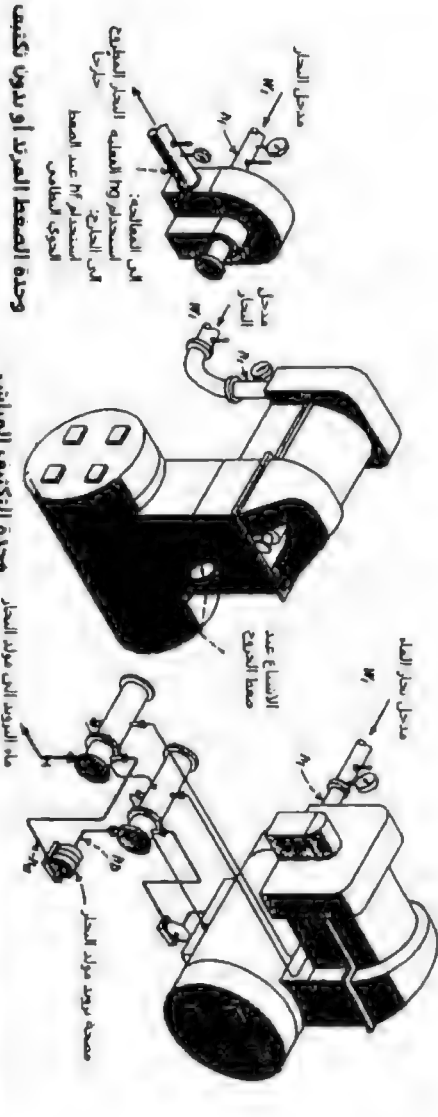
$$\text{مردود المحرك} = \frac{3413P}{(W_1 - W_g)(h_1 - h_s) + W_g(h_1 - h_{sg})}$$

حيث

W_g = البخار الخارج من العنفه عبر السدادات (الجلب) والتسربات، lb/h.

h_s = انتالي بخار الماء الخارج من العنفه عند نفس انثروي بخار الماء الداخل، Btu/lb.

h_{sg} = انتالي بخار التصريف عند نفس انثروي بخار الماء الداخل للعنفه، Btu/lb.



الشكل 9.2 الدارات الأساسية التي تعمل وفقها المعفات البخارية

ومن أجل العنفات ذات التكثيف المباشر (straight - condensity turbines):

$$\text{معدل الحرارة, Btu/kWh} = \frac{(W_1 - W_g)(h_1 - h_f) + W_g(h_1 - h_{fg})}{P}$$

حيث

h_f = انثالي الماء المشيع عند ضغط الخروج، Btu/lb (انظر المخطط).

h_{fg} = انثالي التبخر لبخار الماء المتسرب عند ضغط التفريغ، Btu/lb.

$$\text{مردود المحرك} = \frac{3413P}{(W_1 - W_g)(h_1 - h_f) + W_g(h_1 - h_{fg})}$$

ومن أجل العنفات ذات التسخين المتجدد:

$$\text{معدل الحرارة, Btu/kWh} = \frac{W_1(h_1 - h_f) + P_1(h_a - h_b)}{P}$$

حيث

h_f = انثالي ماء التزويد المغادر لآخر مسخن، Btu/lb.

h_a = انثالي ماء التزويد المغادر لمضخة تزويد المولد، Btu/lb.

h_b = انثالي ماء التزويد الداخل إلى مضخة تزويد المولد، Btu/lb (انظر المخطط).

$$\begin{aligned} \text{مردود المحرك} &= \frac{3413P}{W_{b1}(h_1 - h_{sb1}) + W_{b2}(h_1 - h_{sb2})} \\ &+ \dots + W_{bn}(h_1 - h_{sbn}) \\ &+ W_g(h_1 - h_{sg}) \end{aligned}$$

حيث

$W_{b1}, W_{b2}, \dots, W_{bn}$ = تدفقات بخار الماء الفائض، lb/h.

$h_{sb1}, h_{sb2}, \dots, h_{sbn}$ = قيم الانثالي لبخار الماء الفائض عند نفس انثالي بخار الماء

الداخل، Btu/lb.

W_e = تدفق بخار الماء المطروح، lb/h.

h_{se} = انثالي بخار الماء المطروح عند نفس انثروبي بخار الماء الداخل، Btu/lb.

ويعطى المردود الحراري من أجل جميع أنواع العنفات بالعلاقة:

$$\text{المردود الحراري} = \frac{3413}{\text{معدل الحرارة، Btu per kWh}}$$

ويمكنك استخدام عوامل التحويل التالية لحساب المعادلات السابقة:

$$\text{lb/kWh} \times 0.126 = \text{Kg/MJ}$$

$$\text{lb/h} \times 0.454 = \text{Kg/h}$$

$$\text{Btu/kWh} \times 0.95 = \text{KJ/kWh}$$

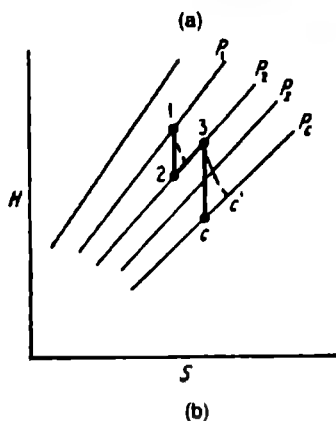
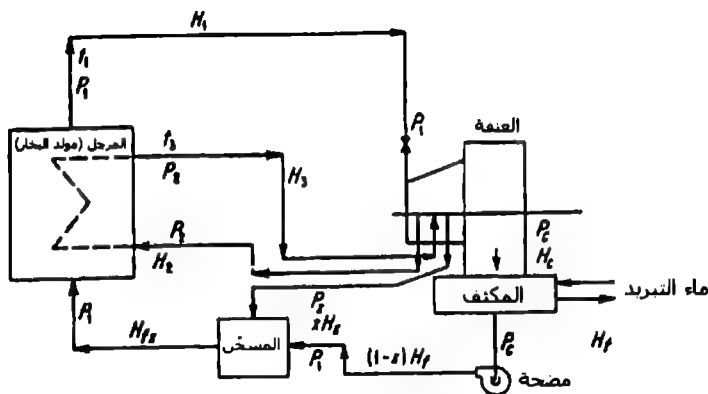
$$\text{Btu/lb} \times 2.33 = \text{KJ/Kg}$$

معدل البخار للدائرة ذات إعادة التسخين المتجدد

1. قم بتجميع قيم الانثالي والانتروبي والضغط للدائرة (الشكل 9.3).
2. احسب نسبة بخار الماء الذاهبة لمسخّن ماء التزويد، حيث تعطى نسبة البخار اللازمة لمسخّن ماء التزويد

$$x = (H_{fx} - H_f) (H_x - H_f)$$

3. أوجد معدّل تدفق البخار إلى العنفة، ومن أجل دائرة Rankine فإن،
 $w_e = 3413 / (H_1 - H_c)$



الشكل 9.3 (a) مخطط الدارة، (b) مخطط H-S للدارة المبينة في (a)

4. احسب المردود الحراري للعنفة، حيث يعطى المردود بالعلاقة:

$$E_t = [(H_1 - H_2) + x (H_3 - H_x) + (1 - x) (H_3 - H_c)] / (H_3 - H_2 + H_1 - H_{fx})$$

5. حدد شروط وظروف الإطراح (إخراج غازات العادم)، كما أن مردود المحرك للنعنة يساوي إلى المردود المركب الفعلي للنعنة مقسوماً على المردود الفعلي للمولد.

مردود مولد البخار التوربيني ومعدل البخار

يعطى المردود الحراري المركب ((Combined thermal efficiency (CTE)) بالعلاقة:

$$CTE = (3413/w_r) [1/(h_1 - h_2)]$$

حيث

w_r = معدل تدفق بخار الماء المركب، lb/kWh (Kg/kWh).

h_1 = انثالبي بخار الماء عند ضغط ودرجة حرارة الفوهة، Btu/lb (KJ/Kg).

h_2 = انثالبي بخار الماء عند الضغط العائد من النعنة، Btu/lb (KJ/Kg)، ويتم ذلك باستخدام جداول بخار الماء ومخطط Mollier.

يعطى مردود المحرك المركب (CEE)

$$= \frac{w_i}{w_e}$$

وزن بخار الماء المستخدم من المحرك النظري، lb/kWh

وزن بخار الماء المستخدم من المحرك الفعلي، lb/kWh

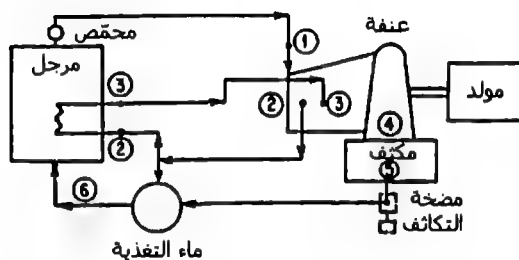
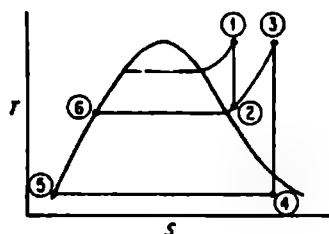
كما يمكن التعبير أيضاً عن أوزان بخار الماء بالوحدات btu/lb (Kj/Kg)، وبالتالي ستكون من أجل المحرك النظري مساوية للقيمة 3413 Btu/lb (7952.3 KJ/Kg)، أما من أجل النعنة الفعلية فيستخدم الفرق $h_1 - h_{2x}$ ، حيث يمثل h_{2x} انثالبي بخار الماء الرطب عند شروط الإفلات، أما h_1 فكما عرفناها سابقاً.

ولإيجاد قيمة CEE علينا أولاً الحصول على معدل تدفق البخار النظري ولإيجاد قيمة $w_i = 3413/(h_1 - h_{2x})$ وتستخدم هذه المنهجية لتحليل مردود أي مولد توربيني مستخدم في منشآت المحطات المركزية والصناعية وفي السفن وفي منشآت أخرى.

دارة المولد التوربيني ذو الحرارة المستعادة: تحليل اختياري

1. قم وباستخدام جداول بخار الماء ومخطط Mollier بإنشاء قائمة تحوي شروط البخار عند نقاط الدارة المبينة بالشكل 9.4. مع اعتبار الدليل 1 لشروط الخفق، وستحوي القائمة القيم التالية:

$$P_1, t_1, h_1, S_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$$



الشكل 9.4 رسم توضيحي للنقاط الهامة في الدارة وموافقاتها على مخطط T-S

2. حدد النسبة المئوية لبخار الماء الذاهب إلى مسخن ماء التغذية. وحدد نسبة مسخن ماء التغذية وهي

$$100 \times \frac{\text{كمية الحرارة المضافة في مسخن ماء التغذية}}{\text{كمية الحرارة المعطاة للمسخن}}$$

3. أوجد كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق. ويعبر عن كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل بفرق الانثالي بين انثالي بخار الماء الخارج من الخانق وانثالي البخار المستنزف عند النقطة 2 مضافاً له فرق الانثالي بين النقطتين 3 و4 مضروباً بالنسبة المئوية لتدفق البخار من تدفق البخار الخارج من الخانق والموافق لهاتين النقطتين.

ويعبر عنها بصيغة معادلة على الشكل التالي:

$$\text{كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل} = H_1 - H_2 + (1.00 - p)(H_3 - H_4)$$

حيث

p = هي النسبة المئوية لبخار الماء المستنزف لتسخين ماء التغذية في مسخن ماء التغذية.

4. احسب كمية الحرارة المقدمة لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق. والتي تعطى بالعلاقة: $H_1 - H_6 + H_3 - H_2$ = كمية الحرارة المقدمة لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق

5. احسب المردود الحراري النظري عن طريق استخدام هذه العلاقة:

$$\text{المردود الحراري النظري} = \frac{\text{كمية الحرارة المحولة إلى عمل}}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

إداء منشآت الطاقة اعتماداً على بيانات اختبار

1. حدد خواص بخار الماء عند النقاط الهامة من الدارة، وباستخدام مخطط Mollier وجداول بخار الماء ارسم الدارة كما في الشكل 9.5، ونستطيع إيجاد النسبة المثوية لبخار الماء المستنزف بالعلاقة:

$$100 \times (H_5 - H_4) / (H_2 - H_4)$$

2. أوجد كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل، ويمكنك استخدام العلاقة:

$$h_w = H_1 - H_2 + (1 - m_2)(H_2 - H_7)$$

حيث

m_2 = تمثل النسبة المثوية لبخار الماء المستنزف بالنسبة لتدفق البخار الخارج من الخانق.

H_7 = انثالي بخار الماء الخارج من العنفة والداخل إلى المكثف.

3. احسب تدفق بخار الماء النظري من العلاقة:

$$r = (3413 \text{ Btu/kWh}) / h_w$$

وبالتالي مردود الدارة

$$Ce = \frac{\text{كمية الحرارة المحولة إلى عمل}}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

4. حدد تدفق بخار الماء المركّب، ويحدد تدفق بخار الماء المركّب ولوحدة فعلية بالعلاقة:

$$R_c = \frac{\text{بخار ماء مستهلك lb}}{\text{مولدة kWh}}$$

5. أوجد المردود الحراري المركب لوحدة فعلية، والذي يعطى بالعلاقة:

$$TE_c = \frac{3413}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

6. احسب المردود المحرك المركب، حيث أنه يساوي إلى TE_c/C_e

المنشآت الهيدروكهربائية والعنفات الهيدروليكية

رموز واختصارات

Q = التدفق، ft^3/s (m^3/s).

H = ارتفاع (ذروة) الموقع، ft (m).

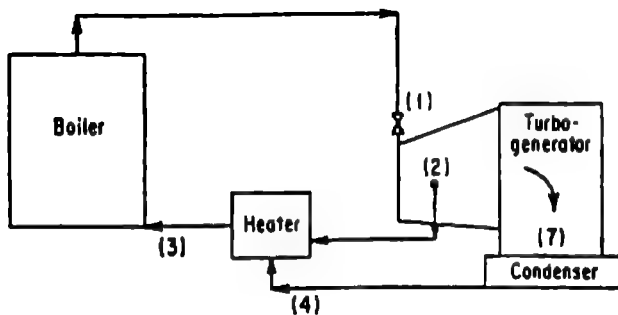
σ = معامل التكيف.

H_b = قراءة البارومتر، ft (m).

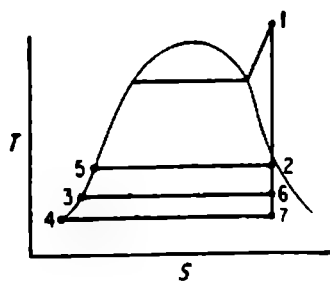
H_v = ضغط التبخر، ft (m).

H_s = ارتفاع السحب الستاتيكي للموقع، ويقاس من سطح المجرى المائي إلى طرف ريشه الدوار ft (m).

H_e = الارتفاع الفعّال، ft (m).



(a)



(b)

الشكل 9.5 رسم لدارة بخار ماء

استطاعة الماء

يُعطى خرج القدرة النظري لتوضع هيدروليكي بالعلاقة:

$$\text{Water hp} = \frac{QH}{8.8}$$

أو

$$\text{Water kW} = \frac{QH}{11.8}$$

السرعة النوعية

تُعرف السرعة النوعية لعنفة هيدروليكية بشكل مختلف عملياً عن تعريفها في المضخات. فهنا يكون ارتفاع الموقع وخرج القدرة مرتبطان بشكل وثيق، مما يجبرنا على أن نعرف السرعة النوعية على أنها تلك السرعة لوحدة ذات قطر مناسب وخصائص متماثلة والتي تعمل على إعطاء حصان بخاري واحد (0.754 kW) عند ارتفاع سائل مقداره قدم واحد (0.3048 m) أو:

$$N_s = \text{specific speed} = \frac{\text{rpm} \times \text{shp}^{0.5}}{\text{head}^{1.25}}$$

التكهف

يجب أن يتوضع الدولاب المائي على ارتفاع يأخذ بعين الاعتبار مستوى سطح الماء بحيث نتجنب ظاهرة التكهف، ويجب أن لا تصمم الوحدة للعمل تحت قيم متدنية لمعامل التكهف والذي يعرف كما يلي:

$$\sigma = H_b - H_v - \frac{H_s}{H_e}$$

المكثفات ذات السطوح للعنفات البخارية

يعطى تدفق ماء التبريد لمكثف سطحي (الشكل 9.6) بالعلاقة:

$$G = \frac{950S}{500(t_2 - t_1)} = \frac{1.9S}{t_2 - t_1}$$

حيث

G = تدفق ماء التبريد، gal/min.

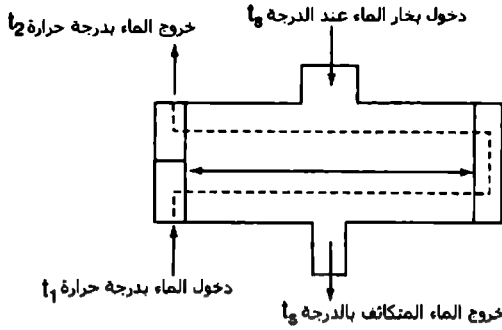
S = كمية البخار المتكاثفة، lb/h.

t_2 = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

t_1 = درجة حرارة الماء الداخل، °F.

(ملاحظة: افترضنا أنه سيتم إزالة 950 Btu من كل ليبرة واحدة من بخار الماء)،
وَتُعْطَى مساحة سطح أنبوب المكثف بالعلاقة:

$$A = \frac{kL}{V} G$$



الشكل 9.6 درجات حرارة المكثف ذو السطح المستخدمة في حسابات الأداء

حيث

A = مساحة سطح المكثف، ft².

k = ثابت معطى في المراجع الهندسية.

L = طول الأنبوب لكل تمريرة، ft.

V = سرعة الماء، ft/s.

وتعطى درجة حرارة الماء الخارج من المكثف بالعلاقة:

$$t_2 = t_N - \frac{t_N - t_1}{e^x}$$

حيث

$$x = (k/V) (U/500)$$

$e^x = 2.7183^x$ ويعطى في المراجع الهندسية.

t_N = درجة حرارة الإشباع لبخار الماء الموافقة للضغط المطلق داخل المكثف، °F.

U = معدّل انتقال كمية الحرارة، LMTD Btu/(ft².h.°F).

التوازن الحراري لمولد البخار

عادةً ما نقوم بإيجاد التوازن الحراري لمولد البخار وذلك لإظهار وبيان توزيع كمية الحرارة المولدة من احتراق ليبرة واحدة من الوقود، وسنعدد فيما يلي الحدود اللازمة لحساب هذا التوازن:

1. كمية الحرارة التي يمتصها مولد البخار (المرجل) [المعادلة a].
2. كمية الحرارة الضائعة مع غازات العادم الجافة [المعادلة b].
3. بخار الرطوبة المشكّل عبر احتراق الهيدروجين في الوقود [المعادلة c].
4. بخار الرطوبة السطحية للوقود [المعادلة d].
5. الضياعات الناتجة عن الاحتراق غير الكامل [المعادلة e].
6. الضياعات الناتجة عن ذرات الكربون غير المحترقة في الرماد [المعادلة f].

7. كمية الحرارة الضائعة اللازمة لتسخين الرطوبة الموجودة في الهواء [المعادلة g].

8. ضياعات الإشعاع والضياعات الأخرى غير المأخوذة بعين الاعتبار.

ويمكن حساب هذه الحدود كما يلي:

(المعادلة a)

$$h_1 = W (H - h_f)$$

حيث

W = ليبرة ماء متبخر فعلياً لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb.

H = كمية الحرارة الموجودة في ليبرة من بخار الماء عند شروط الخروج، أي عند مخرج المحمّص إذا كانت هناك عملية تحميص.

h_f = كمية الحرارة التي تحملها ليبرة واحدة من ماء التغذية الداخل لمولد البخار.

(المعادلة b)

$$h_2 = W_g (T_g - t_f) C_p$$

حيث

W_g = ليبرة من غازات المدخنة الجافة (من مخطط الاحتراق) لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb.

C_p = الحرارة النوعية للغازات (تؤخذ عادة بقيمة 0.24).

T_g = درجة حرارة غازات المدخنة.

t_f = درجة حرارة الهواء الداخل إلى الفرن.

(المعادلة c)

$$h_3 = 9h [212 - t_c + 970.3 + 0.46 (T_g - 212)]$$

حيث

 h = كمية الهيدروجين كجزء من ليبرة وقود محترقة. $9h$ = كمية الماء المتشكل. t_c = درجة حرارة احتراق الوقود.

(المعادلة d)

$$h_4 = w [212 - t_c + 970.3 + 0.46 (T_g - 212)]$$

حيث

 W = ليبرة رطوبة سطح لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb، ويجب أخذ النتائج النهائية بعين الاعتبار. $h_c = 14,150$. أيضاً سيضيع 3960 Btu/lb من جراء تحول C إلى CO.

(المعادلة e)

$$h_5 = \frac{CO}{CO + CO_2} (14,150 - 3960) C_b$$

حيث

CO = النسبة المئوية لغاز CO وتؤخذ من تحليل غازات المدخنة.

CO₂ = النسبة المئوية لغاز CO₂ وتؤخذ من تحليل غازات المدخنة.C_b = وزن الكربون لكل ليبرة من الوقود المحترق فعلياً.والكربون الكلي = C = C_b + C_a

(المعادلة f)

$$h_6 = 14,150 \times \frac{W_a}{W} \times C_a$$

حيث

W_a = وزن الرماد المتجمع خلال فترة الوحدة (فترة محددة).

W = وزن الوقود المحترق خلال فترة الوحدة.

C_a = النسبة المئوية للمواد القابلة للاحتراق في الرماد (يفترض عادة بأن يكون الكربون).

(المعادلة g)

$$h_7 = 10.46 (T_g - t_r)$$

حيث

M = الوزن الفعلي للرطوبة لكل باوند من الهواء الجاف مأخوذة وفق مقياس الرطوبة ذو الحوجة الجافة والرطوبة.

أما البند الثامن من الضياعات فيؤخذ على أنه الفرق بين مجموع المعادلات السبعة السابقة وبين قيمة كمية الحرارة الموجودة في ليبرة وقود محترقة.

انخفاض الضغط في مجاري الهواء المستقيمة لمجاري مولد البخار

لقد قدمت شركة Buffalo Forge Company هذه المعادلة والمقبولة ضمن مجال لرقم رينولدز يتراوح من 25,000 إلى 5,000,000 والذي يغطي عملياً كامل المجال المتعلق بعمل منشأة الطاقة.

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{1.64 FL_{\mu}^{0.16} \rho^{0.84}}{d^{1.24}} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.84} \\ &= \frac{0.03 FL}{d^{1.24}} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.84} \end{aligned}$$

وذلك من أجل هواء بدرجة حرارة (21.1 °C) 70 °F وبضغط بارومتري 29.92 in (759.9 mm).

حيث

ΔP = انخفاض الضغط مقدراً بالإنش عمود ماء.

$F = 0.80$ للأنابيب الملساء والزجاج.

$F = 1.00$ لمجري الهواء المصنوعة من الحديد وتتضمن الأنابيب الفولاذية.

$F = 1.20$ للأنابيب المصنوعة من الآجر والاسمنت الخشن والأنابيب المرشمة بشكل كبير.

L = طول الأنبوب، (m) ft.

μ = لزوجة الهواء أو الغاز، [Kg/(m.s)] lb/(ft.s).

p = قطر مجرى الهواء، (mm) in.

$$= \frac{2 \times \text{الطول} \times \text{العرض}}{\text{الطول} + \text{العرض}}$$
 للمجري مستطيلة المقطع

v = السرعة، ft/min(m/min)

يمكن استخدام العلاقة السابقة لحل ضياعات الاحتكاك للأجزاء المستقيمة من المجري العاملة ولإيجاد الاحتكاك في المداخن.

الأنابيب التي على شكل U ومقاييس الضغط والسحب

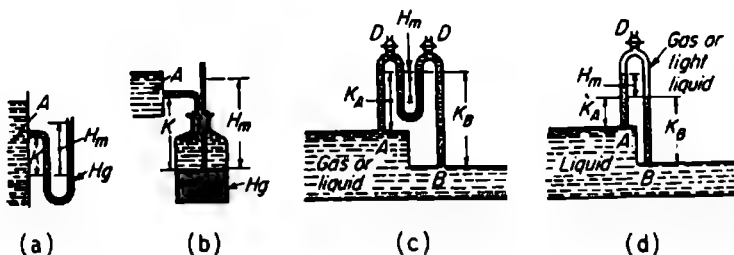
الأنابيب التي على شكل U (الشكل 9.7 a و b)

إذا كان الاختلاف في المنسوب بين مستوى الزيتق والمائع المراد قياس ضغطه بمقدار K ft (m) تحت نقطة الاتصال بينهما A وسيعطي قراءة H_m ft (m) بحيث يكون

$$p_A = H_m \bar{W}_m - K \bar{W}_A$$

عند A

$$H_A = \frac{H_m \bar{W}_m}{\bar{W}_A - K}$$



الشكل 9.7 أنواع مختلفة لمقاييس الضغط

حيث

$$\bar{W}_A = \text{الكثافة الوزنية للمائع عند النقطة A, (Kg/m}^3\text{) (lb/ft}^3\text{)}$$

$$\bar{W}_m = \text{كثافة مائع مقياس الضغط, (Kg/m}^3\text{) (lb/ft}^3\text{)}$$

$$P_A = \text{الضغط المقاس عند النقطة A, (kPa) (lb/ft}^2\text{)}$$

انبوب U التفاضلي

يبين الشكل 9.7c الفرق بين ضغطي القمتين A و B والذان يعطيان كما يلي:

$$p_A - p_B = H_m(\bar{W}_m - \bar{W}_A) + K_A \bar{W}_A - K_B \bar{W}_B \quad *$$

حيث

K_A, K_B = المسافتين الشاقوليتين بين سطح الزئبق العلوي والنقطتين A و B، ft (m).

\bar{W}_A, \bar{W}_B = الكثافة الوزنية للمائع عند النقطتين A و B، lb/ft³ (Kg/m³).

إذا كان الفرق (التفاضل) بين المستويين ناتجاً عن فتحة أو جهاز آخر لقياس تدفق السائل، فعندها يعطى الفرق في الارتفاع عند تلك الفتحة بالعلاقة:

$$\Delta H = p_2 v_1 - p_2 v_2 + Z_1 - Z_2 = H_m \left(\frac{\bar{W}_m}{\bar{W}_A} - 1 \right)$$

وتكون في معظم الغازات - عدا تلك الموجودة تحت ضغوط عالية جداً - قيمة \bar{W}_A و \bar{W}_B صغيرتين جداً بالمقارنة مع \bar{W}_m مما يخفض حدود المعادلة قبل السابقة ويجعلها كما يلي:

$$p_A - p_B = H_m \bar{W}_m$$

انبوب U التفاضلي المقلوب (الشكل 9.7d)

$$p_A - p_B = H_m(\bar{W}_A - \bar{W}_m) + K_A \bar{W}_A - K_B \bar{W}_B$$

وإذا كان القياس يدل على فرق الارتفاع التفاضلي للفتحة وقمة المقياس، والوسيط العامل هو سائل فإن فرق الارتفاع يعطى بالعلاقة:

$$\Delta H = H_m \left(1 - \frac{\bar{W}_m}{\bar{W}_A} \right)$$

الأنابيب المغلقة التي على شكل U

تقيس هذه الأنابيب الضغط المطلق للمائع بشكل مباشر P (الشكل 9.8a).

$$p = H_m \bar{W}_m$$

حيث

$$\bar{W}_m = \text{lbm/ft}^3 \text{ (Kgm/m}^3\text{)} = \text{الكثافة الوزنية للمائع مقياس الضغط.}$$

$$H_m = \text{ارتفاع مائع مقياس الضغط (ft (m).}$$

إذا أردنا قياس ضغط السوائل أو الغازات الموجودة تحت ضغوط عالية جداً فيجب طرح الكمية $K\bar{W}_0$ من المعادلة السابقة.

المقاييس المضاعفة

أنابيب U المائلة (الشكل 9.8c). إذا كانت قيمة القراءة R ft (m)، فيجب عندها تبديل قيمة H_m بالقيمة $H_m = (R - R_0) \sin \theta$ عند حساب العلاقة *، حيث R_0 تمثل القراءة الصفرية.

مقياس السحب. تطبق المعادلات كما طبقناها في المقياس المائل السابق (الشكل 9.8b).

أنابيب U ذات المائعين (الشكل 9.8 d و e)

من أجل النوع I يمكننا كتابة المعادلة:

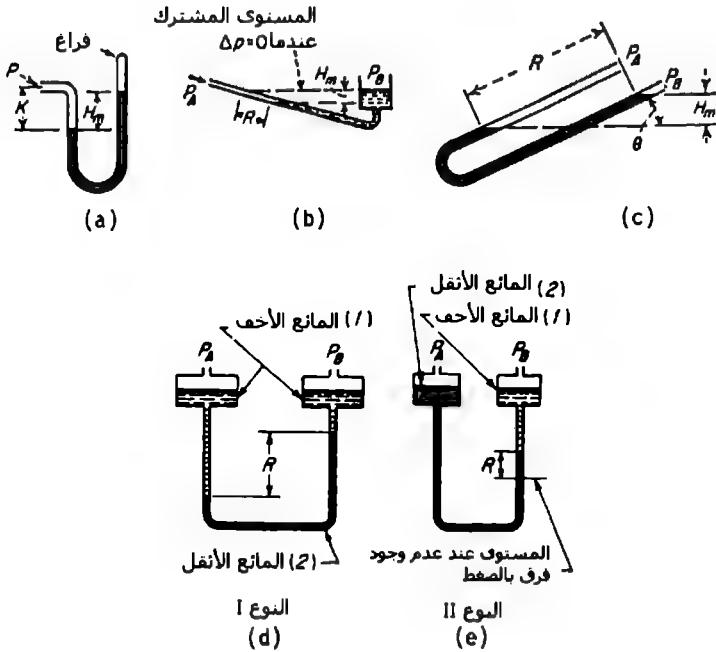
$$p_A - p_B = R - R_0 \left(\bar{W}_2 - \bar{W}_1 + \frac{a}{A} \bar{W}_1 \right)$$

ومن أجل النوع II يمكننا أيضاً كتابة المعادلة:

$$p_A - p_B = R \left[\bar{W}_2 - \bar{W}_1 + \frac{a}{A} (\bar{W}_2 + \bar{W}_1) \right]$$

حيث

 $A =$ مساحة مقطع كل من الخزائين، (m^2) .

 $a =$ مساحة مقطع الأنبوب الذي يشكل الحرف U، (m^2) .


الشكل 9.8 أنواع إضافية لمقاييس الضغط

10

معادلات خاصة بهندسة الموائع

لتبسيط استخدام المعادلات في هذا الفصل سنقوم بإيراد الرموز والاختصارات والوحدات الموافقة لكل تعبير في الجملتين U.S Customary System (USCS) والنظام الدولي (SI) System International في الجدول 10.1.

الخاصة الشعرية

تنتج ظاهرة الخاصة الشعرية عن قوى الترابط بين جزيئات السائل وقوى الالتصاق للجزيئات السائل، والتي تتجلى كاختلاف في ارتفاع سطح السائل بين خارج ودخل أنبوب رفيع مغموس أحد طرفيه في السائل (الشكل 10.1).

ويعبر عن الخاصة الشعرية بمقدار ذلك الارتفاع الذي يعطى وفق المعادلة:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{(w_1 - w_2)r}$$

حيث

h = الارتفاع الناتج عن الخاصة الشعرية، ft (m).

σ = قوى الشد السطحي، lb/ft (N/m).

w_1, w_2 = الوزن النوعي للمائع تحت وفوق السطح السائل المقعر (أو المحدب) على الترتيب، lb/ft (N/m).

θ = زاوية التماس.

r = نصف قطر الأنبوب الشعري، ft (m).

تنقص الخاصة الشعرية - مثل قوى الشد السطحي - مع ازدياد درجة الحرارة، ولكن التغير في درجة حرارة المائع عادةً ما يكون صغيراً ومهملاً في معظم التطبيقات العملية.

الجدول 10.1 الرموز والمصطلحات والأبعاد والوحدات المستخدمة في الهندسة المائية

الرمز	المصطلح	الأبعاد	وحدات USCS	الوحدات الدولية SI
A	المساحة	L^2	ft^2	mm^2
C	معامل خشونة chezy	$L^{1/2}/T$	ft^3/s	$m^{0.5}/s$
C_1	معامل خشونة Hazen-Williams	$L^{0.37}/T$	$ft^{0.37}/s$	$m^{0.37}/s$
d	العمق	L	ft	m
d_c	العمق الحرج	L	ft	m
D	القطر	L	ft	m
E	معامل المرونة	F/L^2	lb/in^2 (psi)	MPa
F	القوة	F	lb	N
g	تسارع الجاذبية الأرضية	L/T^2	ft/s^2	m/s^2
H	الارتفاع الكلي، ارتفاع سد	L	ft	m
h	الارتفاع	L	ft	m
h_f	ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك	L	ft	m
L	الطول	L	ft	m
M	الكتلة	FT^2/L	$lb.s^2/ft$	$N.s^2/m$
n	معامل خشونة Manning	$T/L^{1/3}$	$s/ft^{1/3}$	$s/m^{1/3}$
P	المحيط، ارتفاع السد	L	ft	m
P	القوة الناتجة عن الضغط	F	lb	N
p	الضغط	F/L^2	lb/ft^2	MPa
Q	معدل التدفق	L^3/T	ft^3/s	m^3/s
q	معدل تدفق الوحدة	$L^3/T.L$	$ft^3/(s.ft)$	$m^3/(s.m)$
r	نصف القطر	L	ft	m
R	نصف القطر الهيدروليكي	L	ft	m

الرمز	المصطلح	الأبعاد	وحدات USCS	الوحدات الدولية SI
T	الزمن	T	s	s
t	الزمن، السماكة	T, L	s, ft	s, m
V	السرعة	L/T	ft/s	m/s
W	الوزن	F	lb	kg
w	الوزن النوعي	F/L ³	lb/ft ³	kg/m ³
y	عمق قناة مفتوحة أو المسافة من دعامة صلبة	L	ft	m
Z	الارتفاع فوق القدر	L	ft	m
ε	حجم الخشونة	L	ft	m
μ	اللزوجة	FT/L ²	lb.s/ft	kg.s/m
ν	اللزوجة الحركية	L ² /T	ft ² /s	m ² /s
ρ	الكثافة	FT ³ /L ⁴	lb.s ³ /ft ⁴	kg.s ³ /m ⁴
σ	قوى الشد السطحي	F/L	lb/ft	kg/m
τ	إجهادات القص	F/L ²	lb/in ²	MPa

اللزوجة

تعتبر لزوجة المائع μ - والتي تدعى أيضاً بمعامل اللزوجة أو اللزوجة المطلقة أو اللزوجة الحركية - مقياساً لمقاومة المائع للتدفق، والتي يعبر عنها بالنسبة بين إجهادات القص المماسية بين الطبقات المتدفقة وبين معدل تغير السرعة مع العمق:

$$\mu = \frac{\tau}{dV / dy}$$

حيث

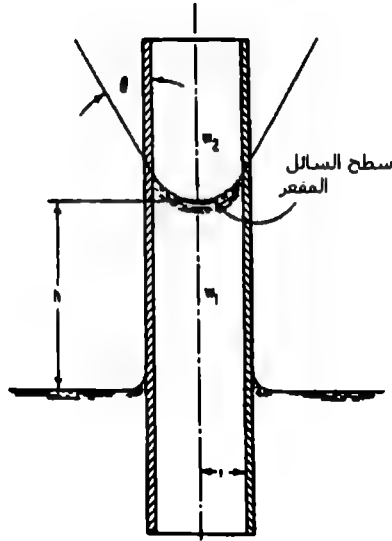
$$\tau = \text{إجهاد القص، } \text{lb/ft}^2 \text{ (N/m}^2\text{)}.$$

$$V = \text{السرعة، ft/s (m/s)}.$$

$$y = \text{العمق، ft (m)}.$$

الجدول 10.1 الرموز والمصطلحات والأبعاد والوحدات المستخدمة في الهندسة المائية
/تتمه/

الرمز	المصطلح	الأبعاد	وحدات USCS	الوحدات الدولية SI
رموز المقادير اللاهيدية				
الرمز	المقدار			
C	معامل السد، معامل الامتلاء			
C _c	معامل التقصص			
C _v	معامل السرعة			
F	عدد Froude			
f	معامل احتكاك Darcy-Weisbach			
L	معامل ضياع الارتفاع			
R	رقم Reynolds			
S	انحدار الاحتكاك، انحدار خط تدرج الطاقة			
S _c	الانحدار الحرج			
η	المردود			
sp gr	الجاذبية النوعية			



الشكل 10.1 الخاصة الشعرية لارتفاع ماء في انبوب شعري، سطح السائل مقعر للأعلى

تتناقص اللزوجة بارتفاع درجة الحرارة ولكن يمكن افتراضها مستقلة عن التغيرات في الضغط في معظم المسائل الهندسية، وتكون لزوجة الماء عند الدرجة 70°F (21.1°C) مساوية للقيمة $0.00002050 \text{ lb.s/ft}^2$ (0.00098 N.s/m^2).

وتعرف اللزوجة الحركية ν على أنها اللزوجة μ مقسمة على الكثافة ρ ، وسميت باللزوجة الحركية فقط لأجل واحداتها ft^2/s (m^2/s) - التي هي تركيب من واحدات الحركة (الطول والزمن). ويملك الماء عند الدرجة 70°F (21.1°C) لزوجة حركية مساوية للمقدار $0.00001059 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$).

وغالباً ما نصادف اللزوجة في علم الموائع عند حساب رقم رينولدز الذي يحدد نوعية الجريان هل هو صفحي أو انتقالي أو مضطرب تماماً.

مدخل إلى جريان الموائع

تعبّر معادلة برنولي عن قانون تحوّل القدرة في الموائع والتي لها الشكل التالي:

$$Z_1 + \frac{P_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g}$$

حيث

Z_1 = الارتفاع - ft (m) - عند أي نقطة 1 من المائع الجاري والواقعة فوق مستوي مرجعي مساعد.

Z_2 = الارتفاع - ft (m) - لنقطة 2 من المائع أخفض من النقطة الأولى ولكنها واقعة فوق المستوي المرجعي.

P_1 = الضغط عند النقطة 1 ، lb/ft² (kPa).

P_2 = الضغط عند النقطة 2 ، lb/ft² (kPa).

w = الوزن النوعي للمائع ، lb/ft³ (kg/m³).

V_1 = سرعة المائع عند النقطة 1 ، ft/s (m/s).

V_2 = سرعة المائع عند النقطة 2 ، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s² (9.81 m/s²).

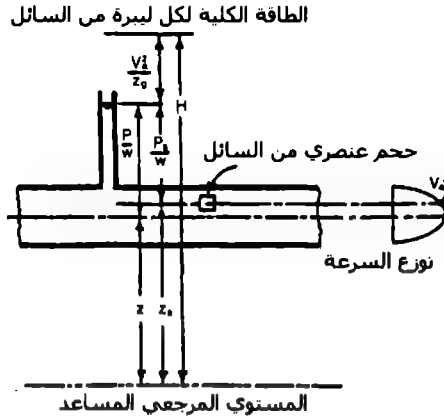
يعبر الطرف الأيسر من المعادلة عن مجموع القدرة (الطاقة) الكلية لكل وحدة وزن من المائع عند النقطة 1، وكذلك يعبر الطرف الأيمن عن الطاقة الكلية لكل وحدة وزن من المائع عند النقطة 2. من الجدير بالذكر أن معادلة برنولي السابقة تطبق فقط على المائع المثالي، ولاستخدامها في التطبيقات العملية يجب إضافة حد آخر يتعلق بالاحتكاك والذي يقوم بإنقاص الارتفاع الكلي (ft (m))، ولنرمز له بالرمز h_f والذي يضاف إلى الحد المعبر عن النقطة الأخفض بالنسبة للجريان، وستصبح عندها معادلة برنولي كما يلي:

$$Z_1 + \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

تتعلق القدرة المحتواة في حجم عنصري من المائع بارتفاعه وسرعته وضغطه (الشكل 10.2).

تسمى الطاقة المتعلقة بالارتفاع بالطاقة الكامنة وتساوي إلى WZ - حيث يدل W على وزن lb (Kg) المائع الموجود في الحجم العنصري و Z يدل على ارتفاعه ft (m) - وذلك بالنسبة لمستوي مرجعي مختار.

تسمى الطاقة الناتجة عن السرعة بالطاقة الحركية، والتي تساوي إلى $WV_a^2 / 2g$ - حيث يُبدل V_a على السرعة ft/s (m/s)، بينما تساوي طاقة الضغط إلى $W P_a / w$ - حيث P_a يدل على الضغط lb/ft^2 (kPa)، و w الوزن النوعي للمائع lb/ft^3 (Kg/m³) -



الشكل 10.2 تعتمد طاقة السائل على الارتفاع والسرعة والضغط

تعطى الطاقة أو القدرة الكلية الموجودة في حجم عنصري من المائع بالعلاقة التالية:

$$E = WZ_a + \frac{Wp_a}{w} + \frac{WV_a^2}{2g}$$

ويتقسم طرقي المعادلة السابقة على الحد W نحصل على الطاقة لكل وحدة وزن من المائع الجاري أو الارتفاع الكلي $ft(m)$:

$$H = Z_a + \frac{p_a}{w} + \frac{V_a^2}{2g}$$

حيث يسمى الحد p_a/w بارتفاع الضغط، و $V_a^2/2g$ بارتفاع السرعة.

وكما هو مبين في الشكل 10.2 يعتبر الحد $z + p/w$ ثابتاً لأي نقطة من المقطع وعمودي على اتجاه الجريان داخل الأنبوب أو القناة، وتتغير الطاقة الحركية في نقاط المقطع تبعاً للسرعة. وعادةً ما نأخذ الحد $z + p/w$ عند النقطة الواقعة على محور الأنبوب أو القناة، كما وتؤخذ السرعة المتوسطة لكامل المقطع وذلك عندما نريد تطبيق معادلة برنولي على الجريان داخل المقطع أو عندما يراد تحديد الارتفاع الكلي.

تُحسب السرعة المتوسطة - $ft/s (m/s)$ بالعلاقة Q/A

حيث

$$Q = \text{يمثل التدفق الحجمي } ft^3/s (m^3/s)$$

$$A = \text{مساحة مقطع الجريان } ft^2 (m^2)$$

مماثلة النماذج الفيزيائية

يعتبر النموذج الفيزيائي نظاماً يمكن استخدامه لإعطاء خصائص أو ميزات نظام مشابه أو منتج ابتدائي عادةً ما يكون أكثر تعقيداً أو مبني بمقياس أكبر بكثير.

وتشكل نسبة قوى الجاذبية واللزوجة والشد السطحي إلى قوة العطالة رقم Froude و رقم Reynolds و رقم Weber على التوالي. وتدل مساواة رقم Froude للنموذج مع رقم Froude للنموذج الأصلي على تناسب قوى الجاذبية على قوى العطالة لكل منهما، وبشكل مشابه يدل تساوي رقم Reynolds للنموذج وللنموذج الأصلي على تناسب قوى اللزوجة على قوى العطالة لكل منهما، أما إذا تساوت قيمة رقم Weber لهما فهذا يعني أن قوى الشد السطحي قوى العطالة متناسبة أيضاً.

يعطى رقم Froude بالعلاقة:

$$F = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

حيث

F = رقم Froude (رقم لا بعدي).

V = سرعة المائع، ft/s (m/s).

L = بعد طويل (طول مميز مثل العمق أو القطر)، ft (m).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s^2 (9.81 m/s^2).

إذا كانت لدينا منشأة هيدروليكية - مثل قناة تصريف الفائض والسد - ويتغير فيها شكل سطح الماء بسرعة فإن القوتين المهيمنتين (المسيطرتين) هما قوى الجاذبية وقوى العطالة، ولذلك فيجب أن يكون رقم Froude للنموذج وللنموذج الأصلي متساويين كما يلي:

$$F_m = F_p \quad \frac{V_m}{\sqrt{L_m G}} = \frac{V_p}{\sqrt{L_p g}}$$

حيث يدل الدليل m على النموذج، والدليل p على النموذج الأصلي.

ويعطى رقم Reynolds بالعلاقة:

$$R = \frac{VL}{\nu}$$

ويعتبر رقم رينولدز R رقماً لا بعدياً، ويدل الرمز ν على اللزوجة الحركية للمائع، ft^2/s (m^2/s). ويكون رقماً رينولدز للنموذج والنموذج الأصلي متساويين إذا كانت قوى اللزوجة والعطالة متناسبتين لكل منهما.

وتصبح قوى اللزوجة هي المهيمنة عندما يتدفق المائع ضمن نظام مغلق، مثل التدفق ضمن أنبوب لا يحوي أي سطح حر. ونحصل على المعادلات التالية عبر مساواة رقمي رينولدز للنموذج والنموذج الأصلي:

$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \quad V_r = \frac{\nu_r}{L_r}$$

يعتبر العاملان المتغيران واللذان يقيدان تصميم النموذج عند اعتبار رقم رينولدز هما نسبة الطول ونسبة اللزوجة.

يعطى رقم Weber بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{V^2 L \rho}{\sigma}$$

حيث

ρ = كثافة المائع، $\text{lb.s}^2/\text{ft}^4$ ($\text{Kg.s}^2/\text{m}^4$) (الوزن النوعي مقسماً على g).

σ = قوة الشد السطحي للمائع، lb/ft^2 (kPa).

يتساوى رقمي Weber للنموذج والمنتج الأولي لأنواع معينة من دراسات الموجات. في حالة تدفق الماء ضمن الأتنية المفتوحة والأنهار حيث يعتبر انحدار الاحتكاك ثابتاً نسبياً، تعتمد غالباً تصميمات النماذج على معادلة Manning. وتحدد النسب بين النموذج والنموذج الأصلي كما يلي:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{(1.486/n_m)R_m^{2/3}S_m^{1/2}}{(1.486/n_p)R_p^{2/3}S_p^{1/2}}$$

حيث

n = معامل خشونة Manning $(\frac{T}{L^{1/3}})$ ، حيث T الزمن المعتبر).

R = نصف القطر الهيدروليكي (L) .

S = الضياع في الارتفاع الناتج عن الاحتكاك لكل واحدة الطول للقناة (رقم لا بعدي).

= انحدار أو ميل تدرج الطاقة.

وتكون من أجل النماذج الحقيقية قيمة $S_r = 1$ و $R_r = L_r$ ، وبالتالي:

$$V_r = \frac{L_r^{2/3}}{n_r}$$

إن من الضروري أن يكون الجريان في نماذج الأنهار والأقنية مضطرباً، ولقد حددت محطة تجارب البحاري المائية الأمريكية (U.S Waterways Experiment Station) بأن الجريان يكون مضطرباً إذا تحققت العلاقة:

$$\frac{VR}{v} \geq 4000$$

حيث

V = السرعة الوسطية، (m/s) أو (ft/s) .

R = نصف القطر الهيدروليكي، (m) أو (ft) .

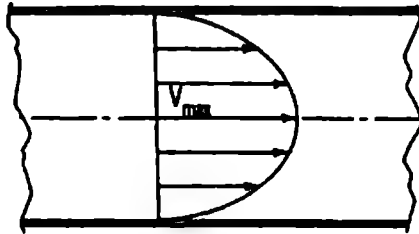
v = اللزوجة الحركية، (m^2/s) أو (ft^2/s) .

إذا أردنا أن نقرّب النموذج من النموذج الحقيقي فإنه يجب جعله كبير الحجم وذلك للتعبير عن الجريان المضطرب، ولكن يعتبر هذا النموذج غير اقتصادي.

جريان المائع في الأنابيب

الجريان الصفحي

تتحرك جزيئات المائع في الجريان الصفحي وفق طبقات متوازية باتجاه واحد. ويأخذ توزيع السرعة في الجريان الصفحي شكل قطع مكافئ - كما يبينه الشكل 10.3 - مما يخلق إجهادات قص تعطى بالعلاقة $\tau = \mu \frac{dv}{dy}$ حيث يمثل $\frac{dv}{dy}$ نسبة تغير السرعة وفق العمق، ويمثل μ معامل اللزوجة. وكلما ازدادت إجهادات القص هذه كلما أصبحت قوى اللزوجة أقل قدرة على تخميد الاضطرابات، وبالتالي سيصبح الجريان بالنتيجة جرياناً مضطرباً. تعتمد منطقة التغير (أو التبدل) على سرعة المائع وكتافته ولزوجته وعلى حجم القناة.



الشكل 10.3 توزيع السرعة لجريان صفحي في أنبوب دائري يكون على شكل قطع مكافئ، وتكون القيمة العظمى للسرعة مساوية لضعف السرعة الوسطية

ولقد تم إيجاد وسيط لا بعدي يدعى رقم رينولدز (Reynolds number) ليكون معياراً يحدد نوع الجريان هل هو صفحي أم مضطرب، ويمثل هذا الرقم نسبة قوى العطالة إلى قوى اللزوجة ويعطى بالعلاقة:

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

حيث

V = سرعة المائع، ft/s (m/s).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

ρ = كثافة المائع، lb.s²/ft⁴ (Kg.s²/m⁴) (وهو الوزن النوعي مقسماً على g ، 32.2 ft/s²).

μ = لزوجة المائع، lb.s/ft² (Kg.s/m²).

$\frac{\mu}{\rho} = \nu$ = اللزوجة الحركية، ft²/s (m²/s).

وإذا كان رقم رينولدز أقل من 2000 فهذا يعني بأن الجريان هو صفحي ضمن الأنابيب الدائرية. وإذا كان رقم رينولدز أكبر من 2000 فإنه يعني بأن الجريان الصفحي غير مستقر، ومن المحتمل أن تكبر الاضطرابات جاعلة الجريان مضطرباً.

يمكن استنتاج المعادلة التالية في الجريان الصفحي والتي تعطى ضياعات الارتفاع الناتجة عن الاحتكاك عبر الافتراض بأن القوى ستؤثر على اسطوانة من المائع موجودة داخل الأنبوب:

$$h_f = \frac{32\mu LV}{D^2 \rho g} = \frac{32\mu LV}{D^2 w}$$

حيث

h_f = ضياعات الارتفاع الناتجة عن الاحتكاك، ft (m).

L = طول مقطع الأنبوب المأخوذ بعين الاعتبار، ft (m).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s² (9.81 m/s²).

w = الوزن النوعي للمائع، lb/ft³ (Kg/m³).

ونستطيع كتابة المعادلة السابقة بعد إدخال رقم رينولدز كما يلي:

$$h_f = \frac{64}{R} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

تشابه هذه المعادلة في الجريان الصفحي معادلة Darcy - Weisbach، وذلك لأنه في الجريان الصفحي يعطى الاحتكاك بالعلاقة:

$$f = 64/R$$

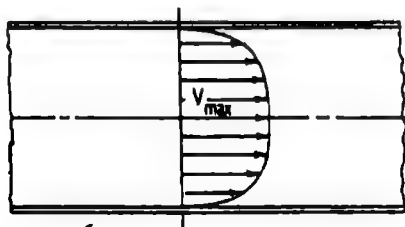
الجريان المضطرب

تكون قوى العطالة كبيرة جداً في الجريان المضطرب بحيث لا تستطيع قوى اللزوجة تخميد الاضطرابات الناتجة أصلاً عن خشونة السطح. وينشأ عن هذه الاضطرابات دوامات والتي لها سرعتين دورانية وانسحابية (انتقالية). ويؤدي انتقال هذه الدوامات إلى مزج وتبادل كميات من المائع خلال مقاطع المجرى وتتوزع السرعة نتيجة لذلك بشكل أكثر انتظاماً - كما يبينه الشكل 10.4 -، وتظهر التحارب المجرأة على الجريان المضطرب ما يلي:

- ❖ تتناسب ضياعات الارتفاع بشكل طردي مع طول الأنبوب.
- ❖ تتناسب ضياعات الارتفاع تقريباً مع مربع السرعة.
- ❖ تتناسب ضياعات الارتفاع تقريباً بشكل عكسي مع القطر.
- ❖ تعتمد ضياعات الارتفاع على خشونة سطح جدار الأنبوب.
- ❖ تعتمد ضياعات الارتفاع على كثافة المائع ولزوجته.
- ❖ تكون ضياعات الارتفاع مستقلة عن الضغط.

معادلة Darcy-Weisbach

تعتبر هذه المعادلة إحدى أهم المعادلات المستخدمة أثناء حساب الجريان داخل الأنابيب، حيث تحدد هذه المعادلة الحالات المشروحة في الفقرة السابقة وتطبق بشكل مقبول على الجريان الصفحي أو المضطرب ولجميع الموائع.



الشكل 10.4 يكون توزيع السرعة لجريان مضطرب في انبوب دائري بشكل منتظم تقريباً أكثر من السرعة في حالة الجريان الصفحي

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

حيث

h_f = ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك، ft (m).

f = عامل الاحتكاك (يمكن إيجاده في المراجع الهندسية).

L = طول الأنبوب، ft (m).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

V = سرعة المائع، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s^2 (9.81 m/s^2).

تستطيع استخدام مخطط Moody لإيجاد قيمة معامل الاحتكاك f .

وبما أن المعادلة السابقة هي معادلة متجانسة بعدياً فإنه يمكن استخدام أي مجموعة والسواحدات بدون أن يغير ذلك من قيمة معامل الاحتكاك، ونستطيع إيجاد قيم الخشونة ϵ ، في ft (m) في المراجع الهندسية، وذلك لأننا سنحتاج إليها عند استخدام مخطط Moody لتحديد معامل الاحتكاك وفق معادلة Darcy-Weisback.

معادلة Chezy

تم وضع هذه المعادلة لتقوم بحساب ضياعات الارتفاع في مجاري الموائع، وهي تعطي نتائج جيدة في الحالة التي تكون فيها أرقام رينولدز مرتفعة:

$$V = C\sqrt{RS}$$

حيث

V = السرعة، ft/s (m/s) .

C = معامل يتعلق بخشونة سطح المجرى.

S = ميل مستقيم تدرج الطاقة أو ضياعات الارتفاع الناتجة عن الاحتكاك (من المجرى ft/ft (m/m) من مجرى ft/ft).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m) .

يحسب نصف القطر الهيدروليكي للمجرى ما عبر تقسيم مساحة مقطع المجرى المار فيه المائع على محيط المقطع المبتل.

معادلة Manning (معادلة التزويد)

لقد أثبت التجارب أن معادلة Manning تتضمن القيمة C في معادلة Chezy التي يجب أن تتغير مع $R^{1/6}$ كما يلي:

$$C = \frac{1.486R^{1/6}}{n}$$

حيث

n - معامل يتعلق بخشونة السطح (يعتمد أيضاً على خشونة السطح، ويعامل n أحياناً على أنه وسيط مركزي لجميع ضياعات الارتفاع). وبالتبديل نجد:

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

وبستعويض $D/4$ - حيث D يمثل قطر الأنبوب - في نصف القطر الهيدروليكي للأنبوب يمكننا كتابة المعادلات التالية المعبرة عن التدفق الكامل ضمن الأنابيب:

$$V = \frac{0.590}{n} D^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{0.463}{n} D^{8/3} S^{1/2}$$

$$h_f = 4.66n^2 \frac{LQ^2}{D^{16/3}}$$

$$D = \left(\frac{2.159Qn}{S^{1/2}} \right)^{3/8}$$

حيث

Q - التدفق الحجمي، ft^3/s (m^3/s).

معادلة Hazen-Williams

تعتبر هذه المعادلة من أشهر المعادلات المستخدمة في حسابات تدفق الماء ضمن الأنابيب، كما أنها صالحة لحالة القنوات المفتوحة أو التدفق ضمن الأنابيب:

$$V = 1.318 C_1 R^{0.63} S^{0.54}$$

ومن أجل التدفق الكامل ضمن الأنابيب:

$$V = 0.55 C_1 D^{0.63} S^{0.54}$$

$$Q = 0.432 C_1 D^{2.63} S^{0.54}$$

$$h_f = \frac{4.727}{D^{4.87}} L \left(\frac{Q}{C_1} \right)^{1.85}$$

$$D = \frac{1.376}{S^{0.205}} \left(\frac{Q}{C_1} \right)^{0.38}$$

حيث

V = السرعة، ft/s (m/s).

C_1 = معامل يتعلق بخشونة السطح (يعطى في المراجع الهندسية).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

S = ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك، (من الأنبوب m/m) من الأنبوب ft/ft.

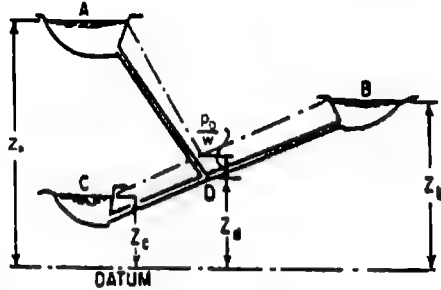
D = قطر الأنبوب، ft (m).

L = طول الأنبوب، ft (m).

Q = التصريف، ft³/s (m³/s).

h_f = ضياعات الاحتكاك، ft (m).

يظهر الشكل 10.5 مسألة نموذجية لثلاثة خزانات، وارتفاعات خطوط التدرج الهيدروليكي للأنابيب الثلاثة متساوية عند النقطة D . ويمكن كتابة معادلة Hazen-Williams لضياع الارتفاع لكل أنبوب متلاقي عند النقطة D . وتطبيق معادلة الاستمرارية لكميات التدفق نستطيع إيجاد عدد معادلات بعدد المجاهيل كما يلي:



الشكل 10.5 التدفق بين الخزانات

$$Z_a = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_A}{D_A^{4.87}} \left(\frac{Q_A}{C_A} \right)^{1.85}$$

$$Z_b = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_B}{D_B^{4.87}} \left(\frac{Q_B}{C_B} \right)^{1.85}$$

$$Z_c = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_C}{D_C^{4.87}} \left(\frac{Q_C}{C_C} \right)^{1.85}$$

$$Q_A + Q_B = Q_C$$

حيث

P_D = الضغط عند النقطة D.

w = واحدة الوزن من السائل.

تغيرات الضغط (الارتفاع) الناتجة عن تغير حجم الأنبوب

نحدث ضياعات القدرة في نقاصات الأنابيب والانحناء والموسعات والصمامات وباقي لوازم الأنابيب. وفي الحقيقة يمكن إهمال هذه الضياعات إذا كان طول

الأنبوب أكبر من 1500 مرة من قطر الأنبوب، أما في الأنابيب القصيرة الطول فقد تؤدي هذه الضياعات إلى زيادة ضياعات الاحتكاك وبالتالي يجب أخذها بعين الاعتبار.

التوسيع المفاجئ

لقد تمّ تحديد المعادلة التالية تحليلياً والتي تستخدم لحساب ضياعات الارتفاع - (m) ft - أثناء مرور المائع ضمن الموسعات المفاجئة، والتي تعطي نتائج تتوافق مع النتائج العملية:

$$h_L = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث

V_1 = السرعة قبل التوسع المفاجئ في المقطع (m/s) ft/s.

V_2 = السرعة بعد التوسع المفاجئ في المقطع (m/s) ft/s.

$$g = 32.2 \text{ ft/s}^2 \text{ (} 9.81 \text{ m/s}^2 \text{)}$$

ولقد قدّم العالم Arches معادلةً أخرى لحساب ضياعات الارتفاع الناتجة عن التوسيع المفاجئ للأنبوب، وتعطي هذه المعادلة نتائج أقرب بقليل من النتائج العملية من المعادلة السابقة:

$$h_L = \frac{1.1(V_1 - V_2)^{1.92}}{2g}$$

التوسيع المتدرج (الموسعات المتدرجة)

تأخذ معادلة ضياع الارتفاع الناتج عن التوسيع المخروطي المتدرج للأنبوب الشكل التالي:

$$h_L = \frac{K(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث

K = معامل الضياع والذي يؤخذ من المراجع الهندسية.

التضييق المفاجئ لحجم الأنبوب (التقليص المفاجئ للمقطع)

لقد تمَّ تحديد المعادلة التالية لحساب ضياع الارتفاع الناتج عن التقليص المفاجئ للأنبوب وفق نفس نوع الدراسات التحليلية السابقة:

$$h_L = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g}$$

حيث

C_c = معامل الرص.

V = السرعة ضمن القطر الأصغر للأنبوب، ft/s (m/s).

وتعطي هذه المعادلة نتائجاً أفضل إذا كان ضياع الارتفاع أكبر من 1 ft (0.3 m).

ولقد قام Brightmore بوضع معادلة تجريبية أخرى لحساب ضياع الارتفاع الناتج عن التقليص المفاجئ للأنبوب والتي لها الشكل التالي:

$$h_L = \frac{0.7(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

تعطي هذه المعادلة نتائجاً أدق إذا كان ضياع الارتفاع أقل من 1 ft (0.3 m).

تعتبر ضياعات الدخول للأنابيب أحد الحالات الخاصة للتقلص المفاجئ، وتقرح بعض المراجع الهندسية قيمة نموذجية لمعامل الضياع K الناتج عن دخول المائع إلى الأنبوب كما يلي:

$$h_L = K V^2 / 2g$$

حيث

V = السرعة ضمن الأنبوب.

ضیاعات الانحناء واللوازم القیاسیة

تعطى ضیاعات الارتفاع الناتجة عن الانحناءات وعن لوازم الأنابيب مثل الصمامات والأكواع بالعلاقة التالية:

$$h_L = \frac{KV^2}{2g}$$

وللحصول على الضیاعات في الانحناءات المغایرة لقيمة 90° ، فإنه يمكن استخدام المعادلة التالية لتعديل قيمة K كما يلي:

$$K' = K \sqrt{\frac{\Delta}{90}}$$

حيث

Δ = زاوية الانحناء بالدرجات، وتعطى قيم K في المراجع الهندسية.

التدفق خلال النوافير

النافورة هي فتحة محيط مغلق يتدفق من خلالها الماء، ويمكن أن تأخذ النوافير أي شكل، إلا أنها عادةً ما تكون مدورة أو مربعة أو مستطيلة الشكل.

تصريف نافورة إلى الهواء الحر

يمكن حساب التصريف المار من نافورة حادة الحواف بالعلاقة:

$$Q = Ca\sqrt{2gh}$$

حيث

Q = التصريف (التدفق المصرف)، ft^3/s (m^3/s).

C = معامل التصريف.

a = مساحة النافورة، ft^2 (m^2).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

h = ارتفاع الماء فوق الخط الأفقي المار بمركز النافورة، ft (m).

يعطى معامل التصريف C في المراجع الهندسية من أجل السرعات المنخفضة، أما إذا كانت السرعة كبيرة فيجب أخذ تأثيره بعين الاعتبار. كما أن قياس الارتفاع اعتباراً من خط المركز للنافورة ليس صحيحاً نظرياً في حالة الارتفاعات الصغيرة، ولكنه يتم تصحيح هذا الخطأ عبر اختيار قيم C .

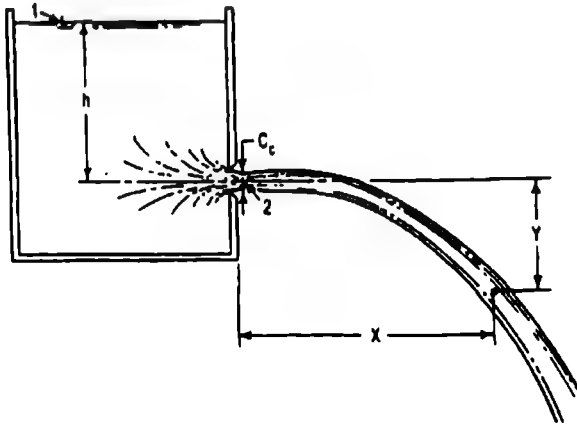
يعتبر معامل التصريف C عبارة عن حاصل ضرب معامل السرعة C_v بمعامل الرص C_e ، ونحصل على معامل السرعة عبر تقسيم السرعة الحقيقية عند عنق النافورة (تقلص التصريف النافث) على السرعة النظرية. ونحصل على السرعة النظرية عبر كتابة معادلة برنولي بين النقطتين 1 و 2 من الشكل 10.6:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{w} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{w} + Z_2$$

وبأخذ المستوي المرجعي المار من النقطة 2 يمكننا تعويض: $V_1 = 0$ ، $Z_1 = h$ ، $Z_2 = 0$ و $P_1/w = P_2/w = 0$ في المعادلة السابقة فنحصل على:

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

ونحصل على معامل الرص C_v عبر الحصول على النسبة بين أصغر مساحة للمائع المنفوث - عنق النافورة - إلى مساحة النافورة. يحدث الرص في المائع المنفوث إذا كانت حواف النافورة عبارة عن مربع، مما يجبر جزء من المائع على الاقتراب من النافورة وفق اتجاه معامد لاتجاه التدفق خلال النافورة.



الشكل 10.6 يأخذ المائع المنفوث مساراً على شكل قطع مكافئ

النوافير المغمورة بالماء

يمكن حساب التدفق خلال النوافير المغمورة عبر تطبيق معادلة برنولي بين النقطتين 1 و 2 في الشكل 10.7 والحصول على العلاقة:

$$V_2 = \sqrt{2g \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L \right)}$$

حيث

h_L = الضياعات في الارتفاع بين النقطتين 1 و 2، ft (m).

وبفرض $V_1 \approx 0$ ووضع $h_1 - h_2 = \Delta h$ ، واستخدام معامل التصريف C في حساب الضياعات نحصل على المعادلة التالية:

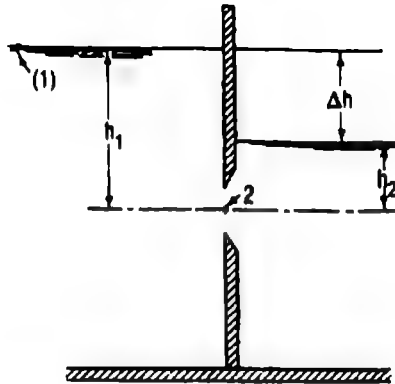
$$Q = Ca\sqrt{2g\Delta h}$$

لا تختلف قيم المعامل C للنوافير المغمورة كثيراً عن قيمة للنوافير غير المغمورة.

معادل التصريف تحت ارتفاع هابيط

تولد عملية التدفق من خزان أو وعاء عندما يكون التدفق الداخل أصغر من التدفق الخارج حالة التصريف تحت ارتفاع هابيط. ويمكن حساب الزمن المطلوب لتدفق كمية محددة من الماء في خزان عبر مساواة حجم الماء المتدفق خلال الفوهة أو الأنبوب خلال زمن dt مع مقدار تناقص حجم الماء في الخزان. وإذا كانت مساحة الخزان ثابتة فإنه يمكننا كتابة:

$$t = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})$$



الشكل 10.7 التصريف خلال نافورة مغمورة

حيث

h_1 = الارتفاع عند بداية التصريف، ft (m).

h_2 = الارتفاع عند نهاية التصريف، ft (m).

t = الزمن المستغرق لانخفاض الارتفاع من h_1 إلى h_2 ، s.

نفث الموائع

بما أن تأثير مقاومة الهواء يعتبر صغيراً على حركة المائع فإن تصريف المائع خلال نافورة إلى الهواء سيأخذ مساراً على شكل قطع مكافئ. وتعطى السرعة الابتدائية للنفث بالعلاقة:

$$V_0 = C_v \sqrt{2gh}$$

حيث

h = الارتفاع فوق الخط المركزي للنافورة، ft (m).

C_v = معامل السرعة.

يعتمد اتجاه السرعة الابتدائية على توضع السطح الحامل للنافورة، وللتبسيط تم الحصول على المعادلات التالية بافتراض أن النافورة واقعة في مستوي شاقولي (انظر الشكل 10.6). تبقى سرعة المائع المنفوث وفق الاتجاه (الأفقي) X ثابتة:

$$V_x = V_0 = C_v \sqrt{2gh}$$

تأخذ السرعة وفق الاتجاه Y قيمة ابتدائية مساوية للصفر، ثم تصبح تابعة للزمن ولتسارع الجاذبية الأرضية:

$$V_y = gt$$

ويعطى الإحداثي X عند الزمن t بالعلاقة:

$$X = V_x t = t C_v \sqrt{2gh}$$

بينما يعطى الإحداثي Y بالعلاقة:

$$Y = V_{avg} t = \frac{gt^2}{2}$$

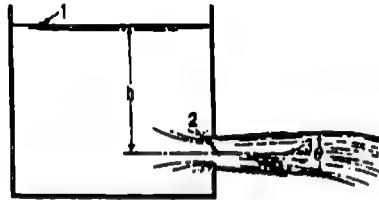
حيث

V_{avg} = السرعة المتوسطة خلال فترة من الزمن t . وتعطى معادلة المسار بالعلاقة:

$$X^2 = C_v^2 4hY$$

تصريف النافورة إلى الأنابيب المخروطية المتباعدة

يستطيع هذا النوع من الأنابيب زيادة التدفق عبر النافورة بشكل كبير عبر تخفيض الضغط عند النافورة إلى ما دون الضغط الجوي. ونحصل على الضغط عند مدخل الأنبوب عبر تطبيق معادلة برنولي بين النقطتين 1 و3 والنقطتين 1 و2 في الشكل التالي:



الشكل 10.8 يزيد الأنبوب المخروطي المتباعد التدفق من خزان عبر نافورة عبر تخفيض الضغط إلى ما دون الضغط الجوي

$$p_2 = wh \left[1 - \left(\frac{a_3}{a_2} \right)^2 \right]$$

حيث

P_2 = الضغط المقاس عند مدخل الأنبوب، lb/ft² (Pa).

w = وحدة الوزن للماء (الكتلة الحجمية للماء)، lb/ft³ (Kg/m³).

h = الارتفاع عند المحور المركزي للنافورة، ft (m).

a_2 = مساحة أصغر مقطع من الماء المنفوث (عنق الفوهة إن كان موجوداً)،

a_3 ، ft² (m²) = مساحة التصريف عند نهاية الأنبوب، ft² (m²). وبحسب معدل

التصريف أيضاً عبر كتابة معادلة برنولي بين النقطتين 1 و 3 في الشكل 10.8.

وحتى يكون هذا التحليل مقبولاً يجب أن يكون الأنبوب تام التدفق، ويجب أن لا ينخفض الضغط عند مقدمة الأنبوب ليصل إلى ضغط تبخر الماء، تظهر تجارب العالم Venturi بأن قيمة الزاوية θ الأكثر فعالية تكون حوالي 5°.

طرق الماء

طرق الماء هو عبارة عن تغير في الضغط - إما أعلى أو أخفض من الضغط الطبيعي - ناتج عن التغير في معدل التدفق داخل الأنبوب.

تعطى معادلة سرعة الماء ضمن الأنبوب كما يلي:

$$U = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{1 + ED/E_p t}}$$

حيث

U = سرعة موجة الضغط داخل الأنبوب، ft/s (m/s).

E = معامل المرونة للماء = $(2.07 \times 10^6 \text{ kPa}) (43.2 \times 10^6 \text{ lb/ft}^2)$.

ρ = كثافة الماء = 1.94 lb.s/ft^4 (الوزن النوعي مقسوماً على تسارع الجاذبية الأرضية).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

E_p = معامل المرونة لمعدن الأنبوب، lb/ft^2 (Kg/m^2).

t = سماكة جدار الأنبوب، ft (m).

إجهادات الأنبوب العمودية على المحور الطولي

تنتج الإجهادات المؤثرة عمودياً على المحور الطولي للأنبوب عن الضغط الداخلي أو الخارجي على سطوح الأنبوب. يُولد الضغط الداخلي إجهاداً يدعى الشد الحلقي (hoop tension)، والتي يمكن حسابه عبر أخذ مخطط الجسم الحر لطول (25.4 mm) 1 in من الأنبوب مقطوعاً بمستوي عمودي على المحور الطولي (الشكل 10.9). تلغى القوى وفق المحور الشاقولي، ويعطي مجموع القوى وفق المحور الأفقي بالعلاقة:

$$pD = 2 F$$

حيث

p = الضغط الداخلي، lb/in^2 (MPa).

D = القطر الخارجي للأنبوب، in (mm).

F = القوة المؤثرة على كل مقطع من حافة الأنبوب، lb (N).

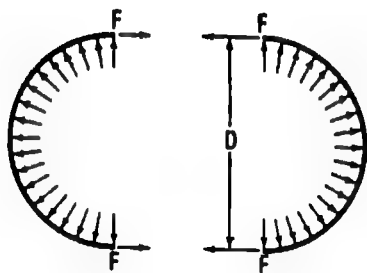
وبالتالي يعطى الإجهاد في مادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa) بالعلاقة:

$$f = \frac{F}{A} = \frac{pD}{2t}$$

حيث

A = مساحة مقطع حافة الأنبوب، ft^2 (m^2).

t = سماكة جدار الأنبوب، (mm) in.



الشكل 10.9 يولد ضغط الأنبوب الداخلي شداً حلقياً

التمدد الحراري للأنبوب

إذا تعرّض الأنبوب لمجال واسع من درجات الحرارة، فإن الإجهاد الناتج عن تغير درجات الحرارة يعطى بالعلاقة:

$$f = cE \Delta T$$

حيث

E = معامل المرونة لمعدن الأنبوب، (MPa) lb/in².

ΔT = تغير درجات الحرارة عن درجة حرارة الإنشاء.

C = معامل التمدد الحراري لمعدن الأنبوب.

وتعطى الحركة الواجب السماح بها - إذا تم استخدام وصلات تمدد - بالعلاقة:

$$\Delta L = Lc \Delta T$$

حيث

ΔL = الحركة وفق الطول L من الأنبوب.

L = المسافة بين وصلتي تمديد.

القوى الناتجة عن انحناءات الأنبوب

إن من الشائع عملياً استخدام كتل دفع في انحناءات الأنبوب لأخذ القوى المؤثرة على الأنبوب الناتجة عن تغير كمية الحركة وضغط الماء الداخلي غير المتوازن.

يعبر الشكل 10.10 عن طريقة ملائمة لإيجاد القوة المحصلة المؤثرة على الانحناء، ويمكن تحليل القوى إلى مركبتين X و Y لإيجاد طويلة واتجاه القوى المحصلة المؤثرة على الأنبوب، ونجد في الشكل 10.10 ما يلي:

V_1 = السرعة قبل تغير حجم الأنبوب، ft/s (m/s).

V_2 = السرعة بعد تغير حجم الأنبوب، ft/s (m/s).

p_1 = الضغط قبل الانحناء أو تغير حجم الأنبوب، lb/ft² (kPa).

p_2 = الضغط بعد الانحناء أو تغير حجم الأنبوب، lb/ft² (kPa).

A_1 = المساحة قبل تغير حجم الأنبوب، ft² (m²).

A_2 = المساحة بعد تغير حجم الأنبوب، ft² (m²).

$F_{2m} = 2 Qw/g V_2$ = القوة الناتجة عن كمية الحركة للماء في المقطع 2.

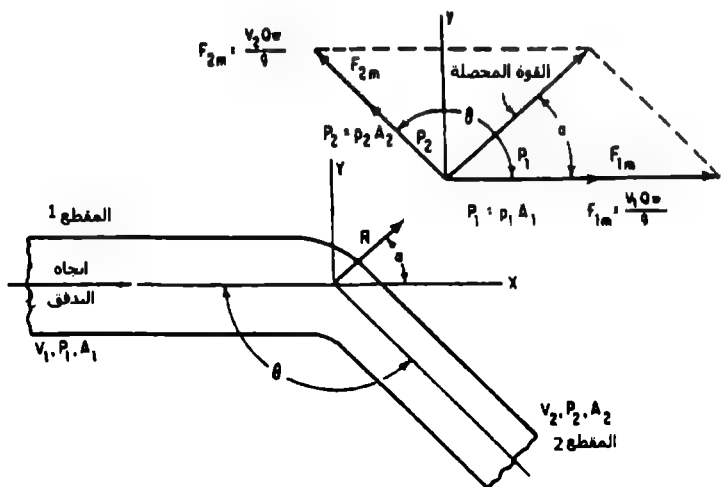
$F_{1m} = 1 Qw/g V_1$ = القوة الناتجة عن كمية الحركة للماء في المقطع 1.

P_2 = ضغط الماء في المقطع 2 مضروباً بمساحة المقطع 2.

P_1 = ضغط الماء في المقطع 1 مضروباً بمساحة المقطع 1.

w = وزن الوحدة للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

Q = التدفق (معدل التصريف)، ft^3/s (m^3/s).



الشكل 10.10 القوى الناتجة عن التدفق ضمن انبوب منحني ومتغير القطر

إذا كان ضياع الضغط مهملاً وليس هناك تغير في طولية السرعة حول الانحناء، فإنه يمكننا تطبيق الحل السريع التالي:

$$R = 2A \left(w \frac{V^2}{g} + p \right) \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\alpha = \frac{\theta}{2}$$

حيث

R = القوة المحصلة المؤثرة على الانحناء، lb (N).

α = الزاوية التي تصنعها المحصلة مع القوة F_{im} .

P = الضغط، lb/ft² (kPa).

w = وزن الوحدة للماء = 62.4 lb/ft³ (998.4 Kg/m³).

V = سرعة الجريان، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s² (9.81 m/s²).

A = مساحة مقطع الأنبوب، ft² (m²).

θ = الزاوية بين طرفي الأنبوب ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$).

الحجم الاقتصادي للأنابيب الموزعة

توجد هناك معادلة لإعطاء قطر الأنبوب الأكثر اقتصادية لنظام توزيع أنابيب المياه وهي:

$$D = 0.215 \left(\frac{fbQ_a^3 S}{aiH_a} \right)^{1/7}$$

حيث

D = قطر الأنبوب، ft (m).

f = عامل احتكاك Darcy-Weisbach.

b = سعر الطاقة (القدرة)، (خلال سنة \$/KW) خلال سنة \$/hp.

Q_a = متوسط معدل التصريف، ft³/s (m³/s).

S = الإجهاد المسموح به لمعدن الأنبوب، lb/in² (MPa).

i = تكلفة الإصلاح لخط الأنابيب سنوياً (معبّراً عنه كجزء من الكلفة الكلية).

H_a = متوسط الارتفاع (الضغط) المطبق على الأنبوب، ft (m).

تحديد القطر المناسب لأنابيب الماء والبخار

تعتبر حسابات ضياعات المائع ضرورية لتحديد الحجم الدقيق للأنبوب. ولذلك تعتبر هذه نقطة البداية لتصميم أي نظام أنابيب سواء أكان لسائل أو غاز. وعادة ما يكون إبقاء السرعة أعلى ما يمكن أمراً أكثر اقتصاداً لأنها تنتج ضياعات أقل، وسيغطي الحجم الأمثل للأنبوب مصاريف سنوية صغرى مثل كلفة الضخ مضافاً لها كلفة الإنشاء الأساسية.

ننصحك بأن تأخذ قيمة السرعة من الجدول التالي والذي يعتمد على التطبيق المراد تمديد الأنابيب له، ولكن تذكر بأنهما ستكون قيمة تقريبية فقط وتحتاج إلى إعادة تقييم بعد إنجاز حساباتك حتى تصل إلى الحجم الاقتصادي.

مجال الخدمة	مجال السرعة	ft/s	m/s
أنابيب الخدمة المائية الرئيسية	2 to 5	2 to 5	0.61 to 1.5
أنابيب مياه الخدمة العامة	4 to 10	4 to 10	1.2 to 3.1
أنابيب مياه تغذية المرجل	6 to 18	6 to 18	1.8 to 5.5
أنابيب البخار الساخن منخفض الضغط.	15 to 70	15 to 70	4.6 to 21.3
أنابيب بخار رئيسية بضغط منخفض	70 to 165	70 to 165	21.3 to 50.3
أنابيب بخار رئيسية بضغط عال	165 to 400	165 to 400	50.3 to 121.9
أنابيب المضخات والمحرك البخاري	100 to 150	100 to 150	30.5 to 45.7
أنابيب العنف البخارية	150 to 330	150 to 330	45.7 to 100.6

تزداد السرعة المسموح بها نوعاً ما مع زيادة قطر الأنبوب، لذلك أعد التحقق من قيم السرعة V نتيجة المعادلات التالية مستخدماً قطر الأنبوب d :

$$V = (d/2) + 4 \quad \text{ft/s} \quad \text{خطوط تصريف المضخة}$$

$$V = 1/3 (d/2) + 4 \quad \text{ft/s} \quad \text{خطوط سحب المضخة}$$

$$V = d \quad 1000 \text{ ft/min} \quad \text{أنابيب البخار}$$

وباستخدام قيمة السرعة التقريبية احسب حجم الأنبوب من المعادلة:

$$ID \text{ of pipe} = \sqrt{\frac{0.409 \times \text{gal / min}}{\text{velocity, ft / s}}}$$

حساب التدفق عبر القياس بالفتنوري

يعطى التدفق المار خلال الفتنوري (الشكل 10.11) بالعلاقة التالية:

$$Q = c K d_2^2 \sqrt{h_1 - h_2}$$

$$K = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{1 - (d_2/d_1)^2}}$$

حيث

Q = معدل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

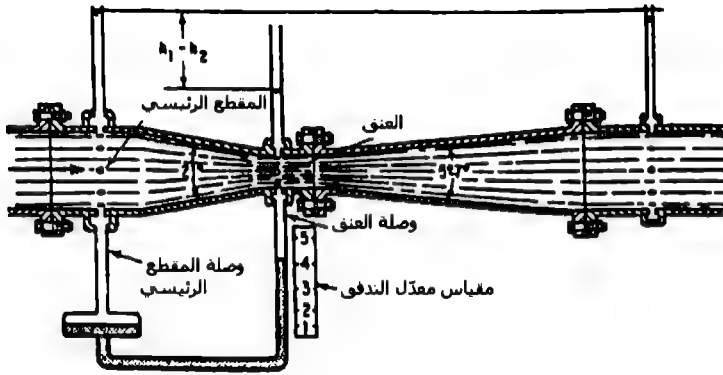
c = معامل تصريف تجريبي يتعلق بالسرعة عند العنق وبالقطر.

d_1 = قطر المقطع الرئيسي، ft (m).

d_2 = قطر العنق، ft (m).

h_1 = الضغط عند المقطع الرئيسي، ft (m) عمود ماء.

h_2 = الضغط عند مقطع العنق، ft (m) عمود ماء.



الشكل 10.11 مقياس فتوري القياسي

الجريان غير المنتظم في الأفقية المفتوحة

سنستخدم الرموز التالية في هذا الفصل:

V = سرعة التدفق في القناة المفتوحة، ft/s (m/s).

D_c = العمق الحرج، ft (m).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

Q = معدّل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

q = معدّل التدفق لكل واحدة عرض، ft^3/ft (m^3/m).

H_m = القدرة النوعية الصغرى، ft.lb/lb (Kg.m/Kg).

وتعطى أبعاد القناة بالأقدام أو الأمتار، كما تم إعطاء الرموز الموافقة لتلك الأبعاد وشرحها من خلال النص.

يحدث التدفق غير المنتظم في الأقنية المفتوحة عندما يتم تغيير مساحة مقطع الجريان بشكل متدرج أو مفاجئ، ولقد أُستخدم المصطلحان التدفق متدرج التغير والتدفق سريع التغير لوصف هذين النوعين من الجريان غير المنتظم، وسنقدم المعادلات التالية للتعبير عن التدفق في حال كون:

(1) إذا كان مقطع القناة مستطيل الشكل.

(2) إذا كان مقطع القناة مثلث الشكل.

(3) إذا كان مقطع القناة على شكل قطع مكافئ.

(4) إذا كان مقطع القناة على شكل شبه منحرف.

(5) إذا كان مقطع القناة دائري الشكل.

تغطي هذه الأنواع الخمسة معظم أنواع الأقنية التي تشاهد في الحياة العملية، ويظهر الشكل 10.12 علاقات القدرة العامة للجريان ضمن الأقنية المفتوحة.

الأقنية مستطيلة المقطع

يساوي العمق الحرج D_c في الأقنية مستطيلة المقطع العمق الوسطي D_m ، ويساوي عرض قعر القناة b العرض العلوي T ، وعندما يؤخذ تصريف السائل كتدفق لكل قدم (متر) من عرض القناة q ، فإن b و T لهما نفس الواحدة. عندها يمكن حساب السرعة المتوسطة V_c بالعلاقة:

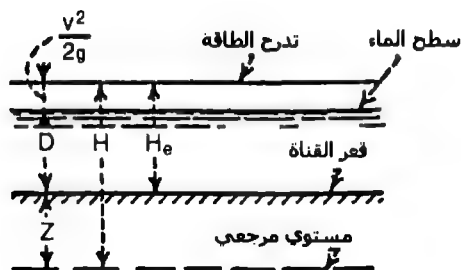
$$V_c = \sqrt{gD_c}$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{g}$$

أيضاً

$$Q = \sqrt{g} b D_c^{3/2}$$



الشكل 10.12 طاقة جريان السائل ضمن القناة المفتوحة

حيث

g يعبر عن تسارع الجاذبية الأرضية بنظام الواحدات الدولية SI أو بنظام USCS.

$$q = \sqrt{g} D_c^{3/2}$$

و

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

وتعطى القدرة النوعية الصغرى بالعلاقة:

$$H_m = \frac{3}{2} D_c$$

ويعطى العمق الحرج بالعلاقة:

$$D_c = \frac{2}{3} H_m$$

عندها يمكن إعطاء معدل التصريف لكل قدم (متر) من العرض بالعلاقة:

$$q = \sqrt{g(2/3)^{3/2} H_m^{3/2}}$$

وبتعويض قيمة $g = 32.16$ تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$q = 3.087 H_m^{3/2}$$

الأقنية مثلثة المقطع

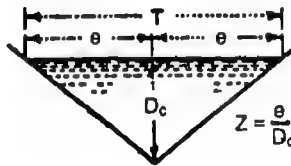
إذا كان العمق الأعظمي D_c فإن العمق الوسطي D_m في الأقنية مثلثة المقطع (الشكل 10.13) يساوي إلى نصف العمق الأعظمي $D_c = \frac{1}{2} D_m$ ، عندها:

$$V_c = \sqrt{\frac{g D_c}{2}}$$

و

$$D_c = \frac{2V_c^2}{g}$$

وكما هو واضح في الشكل 10.13 فإن z تمثل ميل جداري القناة معبراً عنه بالنسبة بين البعد الأفقي إلى البعد الشاقولي، وإذا كان المقطع متناظراً فإنه $z = c/D_c$ وتعطى المساحة بالعلاقة $a = z D_c^2$ وعندها:



الشكل 10.13 القناة المقترحة مثلثة المقطع

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} z D_c^{5/2}$$

و بتعويض $g = 32.16$

$$Q = 4.01 z D_c^{5/2}$$

و

$$D_c = \sqrt{\frac{2Q^2}{gz^2}}$$

أو

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} z H_m^{5/2}$$

و بتعويض $g = 32.16$

$$Q = 2.295 z H_m^{5/2}$$

الأقنية ذات المقطع على شكل قطع مكافئ

إن من المناسب أن نعرف هذه الأقنية بمصطلحين هما العرض العلوي T والعمق D_c ، عندها تعطى مساحة المقطع بالعلاقة $a = 2/3 D_c T$ ، وسنرمز للقطر الوسطي بالرمز D_m .

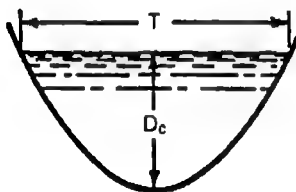
$$V_c = \sqrt{2/3 g D_c}$$

و

$$D_c = \frac{3}{2} \frac{V_c^2}{g}$$

بالتالي

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{27}} TD_c^{3/2}$$



الشكل 10.14 قناة مفتوحة ذات شكل قطع مكافئ

وبتعويض $g = 32.16$

$$Q = 3.087TD_c^{3/2}$$

و

$$D_c = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gT^2}}$$

أيضاً

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{27}} \left(\frac{3}{4}\right)^{3/2} TH_m^{3/2}$$

وبتعويض $g = 32.16$

$$Q = 2.005TH_m^{3/2}$$

الأفنية التي لها مقطع شبه منحرف

يظهر الشكل 10.15 قناة لها شكل شبه منحرف له العمق D_c وعرض القعر b ، ويرمز لميل الوجوده - البعد الأفقي مقسماً على البعد الشاقولي - بالرمز z . وبالتعبير عن أبعاد القناة كتتابع للعمق الوسطي D_m ، عندها يعطى العمق الحرج D_c والسرعة المتوسطة V_c بالعلاقتين:

$$V_c = \sqrt{\frac{b + zD_c}{b + 2zD_c}} g D_c$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{c} - \frac{b}{2z} + \sqrt{\frac{V_c^4}{g^2} + \frac{b^2}{4z^2}}$$

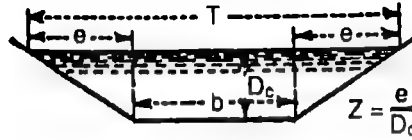
ويعطى معدل التصريف خلال القناة:

$$Q = \sqrt{g \frac{(b + zD_c)^3}{b + 2zD_c}} D_c^{3/2}$$

ويعطى العمق الحرج والقدرة النوعية الصغرى بالعلاقتين:

$$H_m = \frac{3b + 5zD_c}{2b + 4zD_c} D_c$$

$$D_c = \frac{4zH_m - 3b + \sqrt{16z^2 H_m^2 + 16zH_m b + 9b^2}}{10z}$$



الشكل 10.15 قناة مفتوحة ذات مقطع شبه منحرف

الأقنية دائرية المقطع

يظهر الشكل 10.16 قناة نموذجية دائرية المقطع حيث يمكننا حساب a المساحة، و T العرض العلوي، والعمق D_c بالعلاقات:

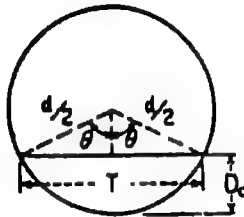
$$a = \frac{d^2}{4} \left(\theta_r - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right)$$

$$T = d \sin \theta$$

$$D_c = \frac{d}{2} (1 - \cos \theta)$$

ثم يعطى التدفق بالعلاقة:

$$Q = \frac{2^{3/2} g^{1/2} (\theta_r - 1/2 \sin 2\theta)^{3/2}}{8(\sin \theta)^{1/2} (1 - \cos \theta)^{5/2}} D_c^{5/2}$$



الشكل 10.16 قناة دائرية المقطع

المضخات

تعريف

المضخة هي آلة أو جهاز لرفع السائل - والذي يعتبر مائعاً غير قابل للانضغاط - إلى مستوى أعلى أو إلى ضغط أعلى. أما الضاغط فهو آلة أو جهاز لرفع الغاز - والذي هو مائع قابل للانضغاط - إلى ضغط أعلى. وتدعى الأجهزة التي تطرد الهواء من أوعية مغلقة بمضخات الهواء، وهي في الواقع ضواغط هواء تعمل تحت الضغط الجوي.

ويضغط النافخ - تمييزاً عن الضاغط - الغاز إلى ضغط أقل نسبياً. أما المروحة فهي بالأصل معدة لتحريك حجوم كبيرة من الغاز، والضغط الناتج عن المروحة صغير وهو أمر ثانوي الأهمية.

قياسات الارتفاع (فرق الضغط)

يتكون فرق الضغط الذي على المضخة تحقيقه أو العمل ضده من ارتفاع ستاتيكي مضافاً له جميع ضياعات الاحتكاك في الأنابيب، ويمكن حساب قيمته إلا أنه يجب من الناحية العملية تحديده ضمن اختبار عبر قياس الضغوط في الأنابيب الموصولة بالمضخة من كلا جانبي الامتصاص والتصريف.

لنفرض

h = الارتفاع الكلي بالأقدام (الأمتار).

p = ضغط السائل معبراً عنه بالأقدام (الأمتار من السائل).

z = ارتفاع مركز مقياس التصريف فوق النقطة التي يقاس عندها ضغط السحب.

v = السرعة بالقدم في الثانية (متر في الثانية) عند المقطع الموصول به المقياس.

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s²).

يشير الدليل d إلى قيم التصريف، بينما يشير الدليل s إلى قيم السحب، وعندها نستطيع أن نكتب:

$$h = p_d - p_s + z + \frac{V_d^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g}$$

إذا كان الضغط عند جهة المدخل أخفض من الضغط الجوي، وإذا استخدمنا ضغط المقياس في المعادلة السابقة عندها سيأخذ الضغط P_g قيمة سالبة.

القدرة (الطاقة)

إذا فرضنا أن

$$q = \text{معدل التصريف, } \text{ft}^3/\text{s} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$G = \text{gal/min (L/min)}$$

$$w = \text{كثافة السائل, lb/ft}^3$$

وتدعى الاستطاعة المسلمة للسائل بالاستطاعة المائية مقدرة بالحصان وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\text{الاستطاعة المائية} = \frac{wqh}{550} \text{ hp} \quad (1 \text{ hp} = 0.75 \text{ kW})$$

وفي حال استخدام الكثافة المألوفة للماء والمساوية للقيمة (8.0 Kg/m^3) (62.4 lb/ft^3) وبالتالي ينتج معنا ما يلي:

$$\text{الاستطاعة المائية} = \frac{qh}{8.81} = \frac{Gh}{3960} \text{ hp} \quad (1 \text{ hp} = 0.75 \text{ kW})$$

ومن أجل أنواع أخرى من السوائل لها الثقل النوعي s، ويجب عندها ضرب العلاقتين السابقتين بالثقل النوعي s. وإذا كان e المردود الكلي للمضخة

عندها تعطى استطاعة الدخل للمضخة والتي تدعى عادةً باستطاعة الكبج (brake horsepower) بالعلاقة:

$$\text{استطاعة الكبج} = \frac{qh}{e \times 8.81} = \frac{Gh}{e \times 3960} \text{ hp} \quad (1 \text{ hp} = 0.75 \text{ kW})$$

تحديد المراديد

يعرّف المردود - ويدعى أحياناً المردود الكلي أو الإجمالي - على أنه النسبة بين الاستطاعة المسلمة من السائل إلى استطاعة الدخل للمضخة، ويعطى بالعلاقة:

$$e = \frac{\text{استطاعة الماء hp}}{\text{استطاعة الكبج hp}} = \frac{\text{استطاعة الماء kW}}{\text{استطاعة الكبج kW}}$$

ويعبر عن المردود الهيدروليكي e_h بالنسبة بين الاستطاعة الفعلية المعطاة من الماء إلى القدرة المقدمة إلى الماء أو السوائل الأخرى، والفرق بين هاتين القيمتين هو ضياعات الاحتكاك الهيدروليكية.

ويعطى المردود الميكانيكي e_m عبر النسبة بين الطاقة المسلمة للماء إلى الطاقة المومنة لإدارة المضخة.

والفرق بينهما هو ضياعات الاحتكاك الميكانيكية، مثل الاحتكاكات في المدحرجات ... الخ.

ويعطى المردود الحجمي e_v عبر النسبة بين كمية الماء الفعلية المسلمة إلى تلك الواجب تسليمها إذا لم يكن هناك ضياعات تسرب، المقطع غير الكامل للصمام، ... الخ.

ونعني بالانزلاق Slip - في حالة المضخات ذات الإزاحة الموجبة - الفرق بين الإزاحة الحقيقية وحجم السائل المسلّم فعلياً معبراً عنه كنسبة مئوية من الإزاحة. وتعطى العلاقة بين الانزلاق والمردود الحجمي على الشكل التالي:

$$\text{Slip} = 100 (1 - e_v)$$

ويكون المردود الكلي عبارة عن حاصل ضرب المردود الهيدروليكي والميكانيكي والحجمي، أي:

$$e = e_h \times e_m \times e_v$$

الخدمة (duty) وهو مفهوم آخر يعبر عن مردود محركات الضخ المقادة بالبخار. ويعبر عن الخدمة عادةً بالقدم. باوند من العمل المنجز لكل 1000 ليبرة (J/454 Kg) من البخار المستخر، ولكنه يُعبر بشكل أكثر دقة عن الخدمة بالوحدات التالية، قدم. باوند من العمل المنجز لكل مليون Btu (J/1.1 MJ) مستخرة.

ارتفاع السحب

يمكن حساب ارتفاع السحب النظري كما يلي:

$$L = b - p_v - h_f - \frac{V_s^2}{2g}$$

حيث

L = ارتفاع السحب (علو المص).

b = الضغط البارومتري للسائل، ft (m).

p_v = ضغط التبخر للسائل، ft (m).

h_f = ضياعات الاحتكاك في الصمام وأنابيب السحب، الخ.

V_s = السرعة عند مدخل المضخة (من جهة سحب المضخة).

وإذا كان السائل ماءً فإنه من المفضل إبقاء الضغط أكبر من ضغط التبخر على الأقل بمقدار 10 ft (3 m). ولذلك فإن الارتفاع الأعظمي المسموح به سيكون أقل من القيمة الموجودة في المعادلة السابقة بحوالي 10 ft (3 m).

ويؤخذ ارتفاع السحب عادةً في التطبيقات العملية بقيمة 20 ft (6 m) للماء البارد، ويتناقص كلما ازدادت درجة حرارة الماء، وإذا كانت درجة الحرارة فوق 160 °F (71 °C) فيجب أن يتم تزويد الماء للمضخة وهو تحت ضغط موجب.

الطاقة ضمن أنظمة الضخ

إذا كان المائع غير قابل للانضغاط فإنه يملك قدرة (طاقة) على شكل سرعة وضغط وطاقة كامنة (ارتفاع)، وتنص نظرية برنولي للموائع غير القابلة للانضغاط والجريان ثابت بدون ضياعات، وأن القدرة عند أي نقطة هي مجموع الارتفاع الناتج عن السرعة والارتفاع الناتج عن الضغط والارتفاع الناتج عن فرق المنسوب، ويعتبر هذا المجموع ثابتاً من أجل خط تدفق ضمن المجرى. لذلك تعطى الطاقة (القدرة) H - ft (m) أو lb/ft^3 - النسبية أو المطلقة لأي نقطة من النظام منسوبة إلى مستوي مرجعي مختار بالعلاقة التالية:

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{144p}{w} + Z$$

حيث

V = السرعة، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، وهي تساوي تقريباً 32.17 ft/s^2 (9.81 m/s^2).

p = الضغط (موجب أو سالب)، lb/in^2 (kPa).

w = الوزن النوعي للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

Z = المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي، ft (m).

فرق الارتفاع الكلي للمضخة

يقصد بفرق الارتفاع الكلي للمضخة الفرق في الطاقة بين تصريف المضخة (النقطة 2) وسحب المضخة (النقطة 1)، كما هو موضح في الشكل 10.17، وبتطبيق نظرية برنولي عند كل نقطة، يعطى فرق الارتفاع الكلي للمضخة TH بالأقدام (الأمتار) بالعلاقة التالية:

$$TH = H_d - H_s = \left(\frac{V_d^2}{2g} + \frac{144 p_d}{w_d} + Z_d \right) - \left(\frac{V_s^2}{2g} + \frac{144 p_s}{w_s} + Z_s \right)$$

وتعطى معادلة فرق الضغط للمضخة P_Δ ، psi (kPa) كما يلي:

$$\begin{aligned} P_\Delta &= P_d - P_s \\ &= \left[p_d + 0.433 \text{ sp gr}_d \left(Z_d + \frac{V_d^2}{2g} \right) \right] \\ &\quad - \left[p_s + 0.433 \text{ sp gr}_s \left(Z_s + \frac{V_s^2}{2g} \right) \right] \end{aligned}$$

حيث يدل الدليلان d و s على التصريف والسحب على التوالي، و:

H = الارتفاع الكلي (موجب أو سالب)، قدم بالنسبة لمستوي أو قدم مطلق، (m).

P = الضغط الكلي (موجب أو سالب)، psi نسبية (أو psi مطلقة) (kPa).

V = السرعة، ft/s (m/s).

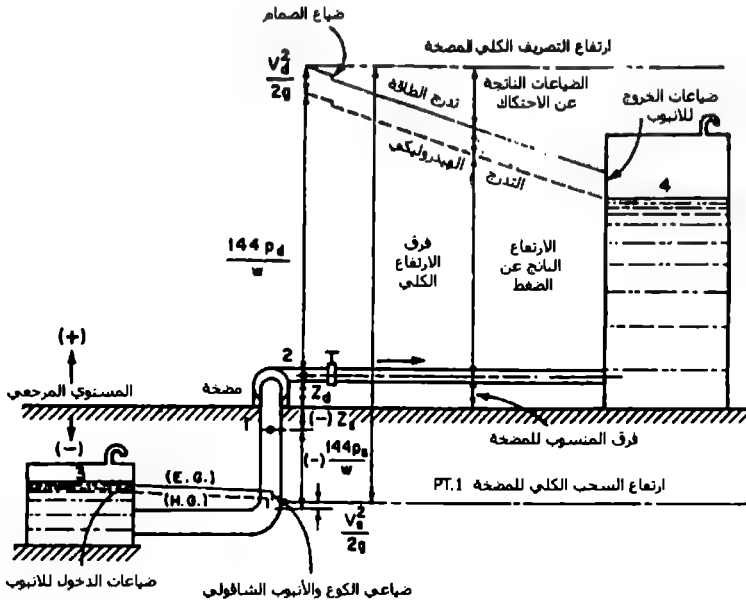
p = الضغط (موجب أو سالب)، psi نسبية أو psi مطلقة، (kPa).

Z = المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي المختار، ft (m).

w = الوزن النوعي للسائل، lb/ft³ (Kg/m³).

sp gr = الكتلة النوعية للسائل.

g = تسارع الجاذبية الأرضية، حوالي 32.17 ft/s^2 (9.81 m/s^2).



الشكل 10.17 الطاقة والتدرجات الهيدروليكية

تؤخذ قيمتا فرق الارتفاع الكلي TH ، ft (m)، وفرق الضغط للمضخة P_d ، psi (kPa) دائماً كميات (كقيم) مطلقة وذلك إما كقيم ضغوط منسوبة (مقاسة) أو كقيم ضغوط مطلقة - ولكن ليس لكليهما - وذلك عند أخذ ضغطي السحب والتصريف للمضخة، كما يجب اختيار مستوي مرجعي عام.

ويمكن نسب فرق الارتفاع الكلي بالأقدام (أمتار) إلى فرق الضغط للمضخة،
psi (kPa) كما يلي:

$$TH = \frac{144P\Delta}{w}$$

ويمكن تطبيق المعادلة العامة التالية لتحديد فرق الارتفاع الكلي للمضخة بين أي نقطتين واقعتين في ضمن نظام الضخ بشرطين الأول أن تكون الطاقة المضافة هي فقط ناتجة عن المضخة والشرط الثاني عدم تغير الوزن النوعي للسائل (مثلاً نتيجة لتغير درجات الحرارة):

$$TH = H_2 - H_1 + \sum h_{f(1-2)} \\ = \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{144p_2}{w} + Z_2 \right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{144p_1}{w} + Z_1 \right) + \sum h_{f(1-2)}$$

حيث يدل الدليلان 1 و 2 على أي نقطتين إحداهما فوق المضخة والثانية تحت المضخة على التوالي، و:

H = فرق الارتفاع الكلي (موجب أو سالب)، ft نسبي أو ft مطلق، (m).

V = السرعة، ft/s (m/s).

p = الضغط (موجب أو سالب)، lb/in² نسبي أو psi مطلق، (kPa).

Z = المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي المختار، ft (m).

w = الوزن النوعي للسائل (ويفترض أن يبقى نفسه عند النقطتين)، lb/ft³ (Kg/m³).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، حوالي (9.81 m/s²) (32.17 ft/s²).

$\sum h_f$ = مجموع الضياعات بين النقطتين، ft (m).

عند معرفة الثقل النوعي للسائل، فيمكن عندها حساب فرق الارتفاع الناتج عن الضغط بالقدم (بالمتر) من العلاقة التالية:

$$\frac{144p}{w} = \frac{2.31p}{sp\ gr}$$

كما يمكن حساب السرعة ضمن الأنابيب بالقدم في الثانية (بالمتر في الثانية) من المعادلة التالية:

$$V = \frac{gpm \times 0.408}{(pipe\ ID)^2}$$

معادلات الاستطاعة والضغط والتدفق للمضخة

يتم ضخ السائل عبر مضخة دوارة بتدفق معين، (gpm (gallons per minute، والذي يتغير ويتعلق بدوران محور المضخة بعدد دورات في الدقيقة، (rpm (revolutions per minute، كما يلي:

$$\frac{gpm_2}{gpm_1} = \frac{rpm_2}{rpm_1}$$

حيث يدل الدليلان 1 و 2 على معدل تدفقين مختلفين عند سرعتي دوران للمحرك. يتغير الارتفاع المحقق HD في المضخة وفق مربع معدل التدفقين وأيضاً وفق مربع سرعتي الدوران كما يلي:

$$\frac{HD_2}{HD_1} = \left(\frac{gpm_2}{gpm_1} \right)^2 = \left(\frac{rpm_2}{rpm_1} \right)^2$$

وتتغير استطاعة الدخل للمضخة مع مكعب معدل التدفق، ومكعب سرعة الدوران، ومع الارتفاع المحقق بقوة 1.5 كما يلي:

$$\frac{bhp_2}{bhp_1} = \left(\frac{gpm_2}{gpm_1} \right)^3 = \left(\frac{rpm_2}{rpm_1} \right)^3 = \left(\frac{HD_2}{HD_1} \right)^{1.5}$$

ويمكن حساب استطاعة الكبح لدخل المضخة بالحصان البخاري bhp، لتدفق معطى (gpm) ولنقل نوعي للسائل sp gr، وإذا كان مردود المضخة Pump_{EFF} معروفاً وفق المعادلة التالية:

$$bhp = \frac{gpm \times HD \times sp\ gr}{3960 \times pump_{EFF}}$$

وإذا تمت إدارة المضخة بمحرك كهربائي، وإذا كان مردود المحرك (محرك/محور، M/D_{EFF}) حوالي % (85 - 95) فإنه يمكن حساب استطاعة الحركة الكهربائي كما يلي:

$$mhp = \frac{bhp}{M / D_{EFF}}$$

ويعطى الارتفاع الناتج عن السرعة V_H، ft (m)، في نظام الضخ وفق العلاقة:

$$V_H = \frac{V^2}{2g}$$

حيث

V = سرعة السائل ضمن الأنبوب، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s² (9.81 m/s²).

ويعطى ارتفاع الضخ للمضخة بالأقدام (بالأمتار) من السائل الذي يضخ وفق العلاقة:

$$HD = \frac{P \times 2.31}{sp\ gr}$$

حيث

sp gr = الثقل النوعي للسائل المراد ضخه، بالمقارنة مع الثقل النوعي للماء = 1.0.

ضياعات الضغط ضمن الأنابيب والملحقات

إذا تدفق مائع ضمن أنبوب أو ملحقات الأنابيب، فإنه ستحدث ضياعات في الضغط ناتجة عن الاحتكاك ضمن الأنبوب والمقاومة التي تبديها الملحقات. وإذا كان الأنبوب طويلاً فإن ضياعات الضغط الناتجة عن الانحناءات أو الصمامات أو الملحقات الأخرى تعتبر مهمة مقارنةً مع الضياعات الناتجة عن طول الأنبوب نفسه، أما إذا كانت الأنابيب قصيرة مع استقامات قليلة فعندها تصبح الضياعات الناتجة عن الانحناءات والصمامات والملحقات الأخرى مؤثرة ولا يمكن إهمالها.

وتستطيع لحساب ضياعات الضغط ضمن الأنابيب المستقيمة استخدام معادلة Darcy-Weisbach أو معادلة Manning أو معادلة Hazen-Williams، بينما تحسب الضياعات ضمن الانحناءات أو الصمامات أو الملحقات الأخرى عبر إيجاد الطول المكافئ لها كما هو مبين في الجدول 10.2. حيث يضاف الطول المكافئ إلى الطول الأصلي للأنابيب لتحديد الطول الكلي الذي سيستخدم في حسابات ضياعات الضغط. ويمكن استخدام أية معادلة من المعادلات الثلاث المذكورة بعد إيجاد الطول الكلي (الإجمالي) وتعويضه وذلك لحساب الضياعات في الضغط.

ارتفاع السحب الموجب الصافي للمضخات الترددية

يتحرك المكبس في المضخات الترددية للأمام والخلف ضمن الاسطوانة مولداً فرقاً في التسارع، ولذلك يجب علينا التعامل مع ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر.

ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر

يعرّف ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر (NPSHA) على أنه فرق الارتفاع الستاتيكي مضافاً له فرق ارتفاع الجوّ مطروحاً منه ضياعات الرفع والاحتكاك وضغط التبخر والارتفاع الناتج عن السرعة والارتفاع الناتج عن التسارع مقدراً بالقدم والمأخوذ عند المحور المار من مركز أنبوب السحب.

ويمكن اعتبار الارتفاع الناتج عن التسارع هو العامل الأعلى في NPSHA، وقد يبلغ في بعض الحالات عشرة أضعاف جميع الضياعات الأخرى. ولتحديد الارتفاع الناتج عن التسارع يجب معرفة معلومات عن المضخة وعن نظام السحب، ولا يمكن حسابه ما لم تتوفر هذه المعلومات.

الارتفاع الناتج عن التسارع

يكون التدفق في أنبوب السحب متموجاً بشكل دائم ويكون متسارع أو متباطئ بشكل مستمر ودوري، ولا يعتبر الارتفاع الناتج عن التسارع ضياعاً لأن الطاقة سيعاد تخزينها خلال التباطؤ. ويعرّف الارتفاع الناتج عن التسارع وفق العلاقة التالية:

$$H_a = \frac{L \times V \times n \times C}{g \times K}$$

حيث

H_a = ضياع الارتفاع الناتج عن التسارع، ft (m).

L = طول أنبوب السحب، ft (m).

V = السرعة الوسطية في أنبوب السحب، ft/s (m/s).

الجدول 10.2 الطول المكافئ متعلقاً بقطري الأنبوب L/D لمختلف الصمامات والملحقات

450	صمام كروي، مفتوح كاملاً
200	صمام زاوي، مفتوح كاملاً
13	صمام بوابي، مفتوح كاملاً
35	بثلاثة أرباع الفتح
160	بنصف الفتح
900	بربع الفتح
135	صمامات فحص دوارة، فتحة كاملة
150	صمامات فحص كروية، فتحة كاملة
20	صمامات فراشة، 6 مداخيل أو أكثر، فتحة كاملة.
30	كوع قياسي 90°
16	كوع قياسي 45°
20	كوع بنصف قطر كبير 90°
50	كوع شارع 90°
26	كوع شارع 45°
	شكل T قياسي:
20	التدفق خلال الاتجاه الرئيسي
60	التدفق خلال فرع

$$V = \frac{\text{gpm} \times 0.321}{\text{in}^2, \text{مساحة مقطع أنبوب السحب}}$$

حيث

n = سرعة دوران المضخة، rpm.

g = تسارع الجاذبية الأرضية = 32.2 ft/s².

K = عامل يتعلق بالموائع المختلفة:

1.4 للماء.

2.5 للنفط.

1.0 سائل مع غاز إدخال.

C = عامل يتعلق بنوع المضخة:

0.115 ثنائية

0.006 ثلاثية

0.08 رباعية

0.04 خماسية

0.055 سداسية

0.028 سباعية

عندما يتكون نظام السحب من أنابيب مختلفة الأقطار، قم بحساب الارتفاع الناتج عن التسارع لكل مقطع على حدة، ثم اجمع الارتفاعات الناتجة عن التسارع لكل مقطع للحصول على الارتفاع الكلي.

إذا كان ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر - بما فيه الارتفاع الناتج عن التسارع - أكبر من الممكن تأمينه من نظام السحب فإنه يجب زيادة ارتفاع السحب الموجب الصافي، والذي يمكن تحقيقه عبر:

1. زيادة الارتفاع الستاتيكي.

2. زيادة الضغط الجوي.

3. إضافة مضخة دعم للنظام.

4. إضافة محمّد نبضات.

نستطيع إيجاد أبسط تعريف للارتفاع الناتج عن التسارع كما يلي:

$$G_s = V \times n \times C = ft/s^2 \text{ السحب في أنبوب التسارع}$$

$$F_s = \frac{W_s \times G_s}{g} = lb, \text{ القوة التي تنتج التسارع}$$

حيث

$$W_s = \text{وزن السائل الموجود في الأنبوب} = LA \times sp\ gr, \text{ و:}$$

$$H_t = \frac{F_s \times 2.31}{A_s \times sp\ gr} = \text{قدم من السائل، الارتفاع النظري}$$

حيث

$$A_s = \text{مساحة مقطع الأنبوب، وبالتبديل نحصل على:}$$

$$H_L = \frac{W_s Vn C \times 2.31}{A_s \times sp\ gr \times g} = \frac{LVn C}{g}$$

$$H_a = \frac{H_t}{K}$$

حيث

$$K = \text{النسبة بين الارتفاع النظري والارتفاع الحقيقي، ولذلك:}$$

$$H_a = \frac{LVn C}{gK}$$

حيث

$$\text{rpm} = \text{سرعة دوران المضخة، rpm.}$$

$$h_s = \text{ارتفاع السحب، ft (m).}$$

$$h_r = \text{ضیاعات الاحتكاك في الأنابيب، ft (m).}$$

- A_s = مساحة مقطع أنبوب السحب، $\text{in}^2 (\text{mm}^2)$.
- L = طول ذراع التوصيل، (من المركز إلى المركز)، $\text{ft} (\text{m})$.
- R = نصف قطر العمود المرفقي، $\text{ft} (\text{m})$.
- l = طول الأنبوب حيثما يتم قياس مقاومة التدفق، $\text{ft} (\text{m})$.
- A_p = مساحة المكبس، $\text{in}^2 (\text{mm}^2)$.

ارتفاع السحب الموجب الصافي لضخات الطرد المركزي

يعبر ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH) h_{sv} عن شروط السحب الأصغرية المطلوبة لمنع حدوث ظاهرة التكهف في المضخة، ويجب أن يحدد ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH) الأصغري أو المطلوب عبر إجراء اختبار عادة ما يتم في المصنع.

ويجب أن يكون NPSH المتوفر مساوياً على الأقل للارتفاع (NPSH) المطلوب إذا أردنا تجنب ظاهرة التكهف، وزيادة NPSH المتوفر سيزيد من هامش الأمان تجاه حدوث التكهف. ونستخدم الرموز التالية والشكل 10.18 لحساب قيمة NPSH:

$$p_s = \text{الضغط المطلق في الوسط المحيط بالمقياس، الشكل 10.18.}$$

p_s = الضغط المقاس (النسي) ويتم الحصول عليه عبر وصل مانومتر إلى أنبوب سحب المضخة المقطع s-s، يمكن أن يكون موجباً أو سالباً.

p_t = الضغط المطلق عند سطح السائل الحر في الخزان المغلق الموصول إلى سحب المضخة.

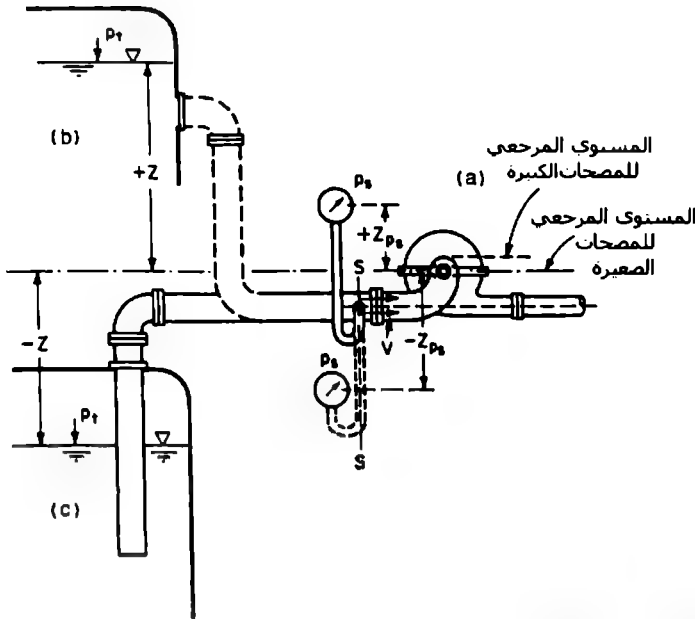
p_{vp} = ضغط التبخر للسائل المراد ضخه والمتعلق بدرجة الحرارة عند المقطع s-s، وإذا كان السائل خليطاً من الهيدروكربونات، فيجب قياس p_{vp} عبر طريقة نقطة تكون الفقاع (bubble point Method).

h_f = الضياع في الارتفاع الناتج عن الاحتكاك في أنبوب السحب بين الخزان والمقطع s-s.

V = السرعة المتوسطة عند المقطع s-s.

Z و Z_{ps} = المسافتين الشاقوليتين المعرفتين في الشكل 10.18، ويمكن أن تكونا موجبتين أو سالبتين.

γ = الوزن النوعي للسائل عند درجة حرارة الضخ.



الشكل 10.18 مخطط توضيحي لحساب ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH)

إن من المفضل اختيار المستوي المرجعي للمضخات الصغيرة كما هو مبين في الشكل 10.18، ولكن في المضخات الكبيرة يجب رفع المستوي المرجعي إلى الارتفاع الذي يحتمل أكثر أن يبدأ عنده حدوث ظاهرة التكيف. فمثلاً يجب اختيار المستوي المرجعي لمضخة كبيرة ذات مروحة بمحور أفقي عند أقصى ارتفاع يوافق الطرف العلوي للعنفة الدوارة.

ويعطى NPSH المتوفر بالعلاقة:

$$h_{sv} = \frac{p_s - p_{vp}}{\gamma} + \frac{p_s}{\gamma} + Z_{ps} + \frac{v^2}{2g}$$

أو

$$h_{sv} = \frac{p_t - p_{vp}}{\gamma} + Z - h_f$$

يجب اختيار وحدات متجانسة تنتمي لنظام وحدات واحد، لذلك سيعطى كل حد موجود في المعادلتين السابقتين بوحدة القدم (أو المتر) من السائل المضخوخ. وأيضاً:

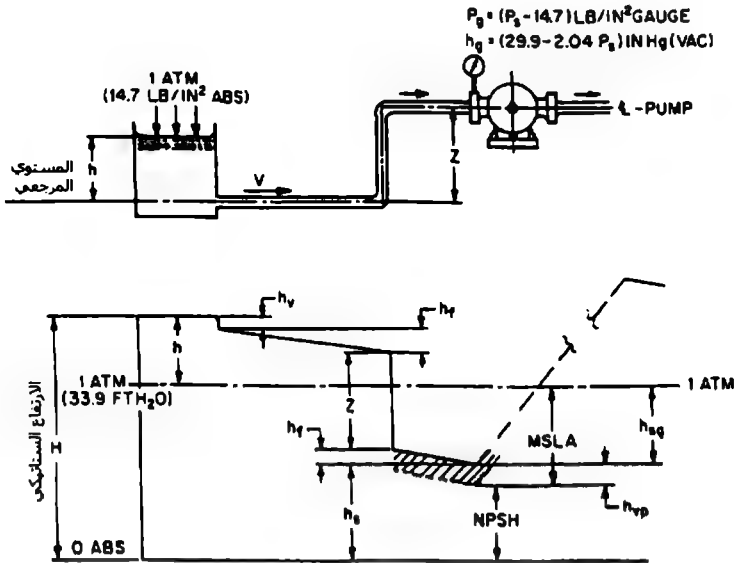
$$h_{sv} = h_b + h_s$$

عادة ما ندعو القيمة الموجبة للارتفاع h_s بارتفاع السحب، بينما تدعى القيمة السالبة للارتفاع h_b بعلو الامتصاص (ارتفاع المص).

المضخات اللولبية وارتفاع الامتصاص الأعظمي

تحدث عملية الامتصاص عندما يكون الضغط الكلي الناتج عند مدخل المضخة أقل من الضغط الجوي، ومن الطبيعي أن يكون ناتجاً عن تغير الارتفاع والاحتكاك داخل الأنبوب. كما تستطيع المضخات اللولبية تأمين تفريغ عالي، ولا يقوم هذا التفريغ بإحبار المائع على التدفق، وكما شرحنا آنفاً فإن الضغط الجوي أو أي

ضغط خارجي (محيط) مطبق هو الذي سيدفع المائع إلى مدخل المضخة. وبما أن الضغط الجوي عند سطح البحر يصل إلى (مطلقة 14.7 psi أو 30 in Hg) فإنه يعتبر الضغط الأعظمي المتوفر لتحريك المائع، ولا يمكن لارتفاع الامتصاص زيادة هذه القيمة أو الفاعلية. وعملياً يجب توفير قيمة ضغط أخفض وذلك ليتغلب بعضه على تغطية الاحتكاك في مداخل الأنابيب والصمامات والأكواع، ... الخ. وإن من الأمور الواجب أخذها بعين الاعتبار عملياً هو إبقاء ارتفاع الامتصاص أقل ما يمكن (الشكل 10.19).



الشكل 10.19 العلاقة بين التدرج الهيدروليكي و NPSH و MSLA.

الارتفاع الكلي عند المنبع = الارتفاع الناتج عن السرعة + ارتفاع المنسوب + الارتفاع الستاتيكي + ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك.

$$H, ft(m) = h + \frac{33.9}{w} = h_v + Z + h_s + \sum (h_f)$$

$$= \frac{v^2}{2g} + Z + \frac{144P_s}{w} + \frac{144P_f}{w}$$

الارتفاع الستاتيكي عند مدخل المضخة = ارتفاع السحب الموجب الصافي + ضغط بخار السائل، ft (m) abs.

$$h_s = NPSH + h_{vp}$$

أو

$$NPSH = h_s - h_{vp}$$

ارتفاع الامتصاص الأعظمي المتوفر - NPSH معبراً عنه كنسبة إلى الضغط الجوي (قراءة المقياس).

$$MSLA = 1 \text{ atm} - NPSH$$

حيث

P_g, h_g = قراءة الضغط المقاس عند مدخل المضخة، مقاس psi و in Hg(vac).

P_s = الضغط الستاتيكي المطلق عند مدخل المضخة، psi.

h_s, h_{sg} = الارتفاع الستاتيكي عند مدخل المضخة، ft (m) من السائل، مطلق أم مقاس (نسي).

Z = الارتفاع الناتج عن فرق المنسوب، ft (m) بالنسبة إلى المستوي المرجعي.

h = مستوى السائل في الخزان، ft (m) بالنسبة إلى المستوي المرجعي.

h_v, h_f = الارتفاع الناتج عن السرعة وضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك.

p_{vp}, h_{vp} = ضغط بخار السائل، مطلق psi، أو الحرارة، مطلق ft (m).

P_{sv} = ضغط الدخول الموجب الصافي، مطلق psi.

NPSH = ارتفاع السحب الموجب الصافي، ft (m) عمود سائل مطلق.

P_{svr} = ضغط الدخول الموجب الصافي الناتج عن عمل المضخة.

MSLA = ارتفاع الامتصاص الأعظمي المقدم من المضخة، ft (m) عمود سائل أو
in Hg(vac).

w = الوزن النوعي للسائل.

السرعة النوعية للمضخات التجارية

تعطي المعادلات التالية - الشكل 10.20 - السرعات النوعية النموذجية للمضخات التجارية. وتعطي السرعة النوعية لأي مضخة طاردة مركزية بالعلاقة:

$$S = \frac{rpm \cdot \sqrt{gpm}}{h_{sv}^{3/4}}$$

من أجل نفس Q, S, h_{sv}

$$n_{\text{doublesuction}} = \sqrt{2} n_{\text{single suction}} = 1.414 n_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, H, h_{sv}

$$(n_s)_{\text{doublesuction}} = \sqrt{2} (n_s)_{\text{single suction}} = 1.414 (n_s)_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, n_s, h_{sv}

$$H_{\text{double suction}} = 1.587 H_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, n

$$(h_{sv})_{\text{doublesuction}} = 0.630 (h_{sv})_{\text{single suction}}$$

$$n_{\max} = \frac{S(h_{sv})^{3/4}}{\sqrt{Q}} \cong \frac{8000(h_{sv})^{3/4}}{\sqrt{Q}}$$

حيث

single suction : سحب مفرد.

double suction : سحب ثنائي.

Q = gpm.

H = قدم من السائل المراد ضخه،

n = rpm.

h_{sv} = قدم من السائل المراد ضخه.

سرعة السحب النوعية S

يمكن أن نحصل على سرعة السحب النوعية S المعادلة التالية:

$$S = \frac{N\sqrt{Q}}{(h_{sv})^{3/4}}$$

لاحظ بأن التدفق Q يساوي نصف التصريف في حالة كون العنفة ثنائية السحب عند حساب S.

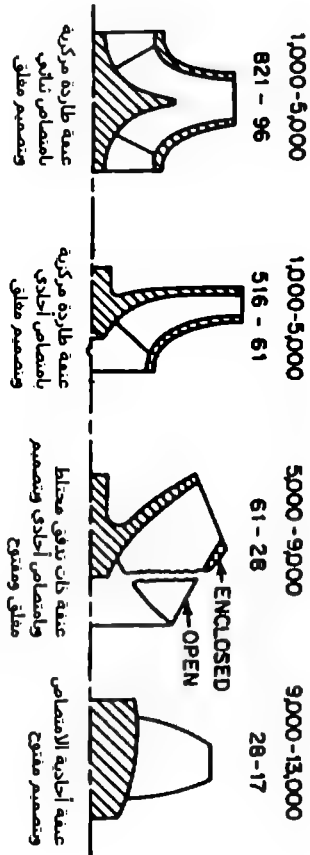
كما يمكن تقسيم المعادلات في الشكل 10.20 إلى الحدود:

$$\sigma = \left(\frac{n_s}{S} \right)^{4/3}$$

أو

$$n_s = S(\sigma)^{1/4}$$

مجال السرعة النوعية
مجال الارتفاع الكلي
الانغماس معامسا بالقدم
والتي يمكن صحتها بقيمة
NPSH = 32.6 ft



الشكل 10.20 حدد السرعة النوعية vs الارتفاع الكلي بارتفاع امتصاص صفري (افترض أن $85^{\circ}F$, 1.0 SPGR, ماء، عند
سطح البحر، يكافئ القيمة 32.6 ft (NPSH) و $8,000$ سرعة سحب نوعية)

تشغيل المضخات الطاردة المركزية عند معدلات تدفق منخفضة

عندما ينخفض التدفق خلال المضخة الطاردة المركزية فإن درجة حرارة السائل المراد ضخه سترتفع بشكل سريع ويمكن حسابها وفق العلاقة:

$$T_m = \frac{42.4 \times P_{so}}{W_w \times C_w}$$

حيث:

T_m = ارتفاع درجة الحرارة، °F/min.

P_{so} = استطاعة الكبش مقدرة بالحصان عند الإيقاف.

42.4 = عامل تحويل من bhp إلى Btu/min.

W_w = وزن السائل الصافي داخل المضخة، lb.

C_w = الحرارة النوعية للسائل (وتساوي 1.0 إذا كان السائل هو الماء).

إذا استمر التدفق خلال المضخة وبعد أن تصبح هذه الشروط مستقرة، فمن الممكن حساب ارتفاع درجة الحرارة خلال المضخة لأي تدفق معطى، وبفرض أن السائل هو الماء فإنه يمكننا استخدام المعادلة التالية:

$$T = \frac{(bhp - whp) \times 2545}{capacity, lb/h}$$

حيث

T = ارتفاع درجة الحرارة، °F/min، و 2545 Btu = مكافئة لحصان بخاري في الساعة hp.hr.

وهناك علاقة أخرى تعطي ارتفاع درجة الحرارة ولكن بدلالة الارتفاع الكلي ومردود المضخة كما يلي:

$$T = \frac{H}{778} \left(\frac{1}{e} - 1 \right)$$

حيث

H = الارتفاع الكلي، ft.

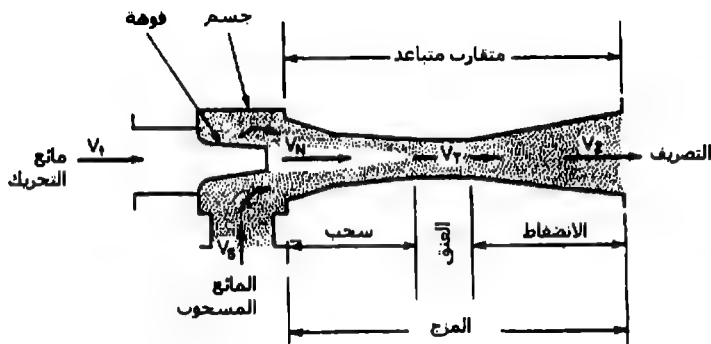
e = مردود المضخة عند السعة المعطاة.

(لاحظ بأن هذه المعادلات تحمل تأثير انضغاطية الماء، ولكن من أجل إجراء حسابات أدق لارتفاع درجة الحرارة وخاصة عند الضغوط المرتفعة جداً فإنه يجب أخذ الحسابات الترموديناميكية بعين الاعتبار).

المستخرجات (المفرّغات) Eductors

مقدمة نظرية وتصميمية

لقد طُوِّرت نظرية المستخرج (المفرّغ) (الشكل 10.21) من معادلة برنولي. حيث يحوّل الضغط الستاتيكي عند مدخل الفوهة إلى طاقة حركية عبر إجبار المائع على التدفق بحرية من خلال فوهة متقاربة. حيث يشكل ذلك المائع الناتج ذو السرعة العالية مائع الامتصاص في حجرة السحب، وتكون نتيجة امتزاج الموائع تدفق بسرعة متوسطة. يقوم الناشر بعدها بتحويل ضغط السرعة ثانية إلى ضغط ستاتيكي عند تصريف المائع من المستخرج.



الشكل 10.21 فوهة نافثة تحول طاقة الضغط إلى سرعة عبر وضع مقارب ومزج الموائع ومن ثم تحويل السرعة ثانية إلى ضغط

وبكتابة معادلة برنولي لمائع التحريك (المائع المحرك) خلال فوهة المستخرج (المفرغ)، يكون لدينا:

$$\frac{P_1}{w_1} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_s}{w_1} + \frac{V_N^2}{2g}$$

حيث

P_1 = الضغط الستاتيكي بعيداً عن الفوهة، lb/ft^2 .

P_s = الضغط الستاتيكي عند الامتصاص (عند فم الفوهة)، lb/ft^2 .

V_1 = السرعة بعيداً عن الفوهة، ft/s .

V_N = السرعة عند فتحة الفوهة (فم الفوهة)، ft/s .

w_1 = الوزن النوعي للسائل المحرك، lb/ft^3 .

قبل الفوهة يمكن اعتبار جميع الطاقة هي ارتفاع ستاتيكي وبالتالي سيحذف الحد V_1 ، وبالتعويض نجد:

$$\frac{V_N^2}{2g} = \frac{P_1 - P_s}{w_1}$$

يدعى هذا الحد بالارتفاع العامل (ارتفاع العمل) (operating head).

وبتطبيق نفس المبدأ ضمن المتقارب المتباعد على الجريان المزوج، ماعدا التأثير المعاكس للفوهة يمكننا كتابة:

$$\frac{P_s}{w_2} + \frac{V_T^2}{2g} = \frac{P_2}{w_2} + \frac{V_2^2}{2g}$$

حيث

P_s = الضغط الستاتيكي عند طرف السحب، lb/ft².

P_2 = الضغط الستاتيكي عند التصريف، lb/ft².

V_T = السرعة خلال عنق المتقارب المتباعد، ft/s.

V_2 = السرعة عند طرف التصريف بعد الفوهة، ft/s.

w_2 = الوزن النوعي للموائع المزوجة، lb/ft³.

وعند طرف التصريف وبعيداً عن الناشر فإننا نفترض بأن السرعة تحولت إلى ضغط ستاتيكي، وبالتالي $V_2 = 0$.

ويمكننا كتابة:

$$\frac{V_T^2}{2g} = \frac{P_2 - P_s}{w_2}$$

يدعى هذا الحد بارتفاع التصريف (discharge head). وتعرف نسبة الارتفاع R_H عندها على أنها الارتفاع العامل منسوباً على ارتفاع التصريف:

$$R_H = \frac{V_N^2 / 2g}{V_T^2 / 2g} = \frac{V_N^2}{V_T^2} = \frac{(P_1 - P_s) / w_1}{(P_2 - P_s) / w_2} = \frac{(P_1 - P_s) w_2}{(P_2 - P_s) w_1}$$

وبسبب وجود النسب فإنه من المناسب استبدال الوزن النوعي بالكتلة النوعية:

$$R_H = \frac{(P_1 - P_s) \rho g r_2}{(P_2 - P_s) \rho g r_1}$$

عندما يكون المائع المحرك هو نفسه المائع المتص، فإنه لا حاجة لتصحيحات الجاذبية وستصبح المعادلة السابقة:

$$R_H = \frac{H_1 - H_s}{H_2 - H_s}$$

حيث

$$H_1 - H_s = \text{الارتفاع العامل، ft.}$$

$$H_2 - H_s = \text{ارتفاع التصريف، ft.}$$

وتحدد شروط السحب عبر تطبيق معادلة الكميات كما يلي:

$$M_1 V_N + M_2 F_s = (M_1 + M_2) V_T$$

حيث

$$M_1 = \text{كتلة المائع المحرك، Slugs (وحدة فنية بريطانية للكتلة).}$$

$$M_2 = \text{كتلة المائع المتص، Slugs.}$$

$$V_N = \text{السرعة عند تصريف الفوهة، ft/s.}$$

$$V_s = \text{السرعة عند مدخل السحب، ft/s.}$$

V_T = السرعة عند عنق المتقارب المتباعد، ft/s.

وباعتبار السرعة عند مدخل السحب معدومة فإنه:

$$M_s = M_1 \left(\frac{V_N}{V_T} - 1 \right)$$

ويعرف الحد التالي على أنه النسبة الوزنية العاملة:

$$R_w = \frac{M_s}{M_1} = \frac{V_N}{V_T} - 1$$

ومعرفة أن الحد V_N^2 / V_T^2 تم تعريفه على أنه نسبة الارتفاع R_H ، سنكتب:

$$R_w = \sqrt{R_H} - 1$$

ويمكن الآن إيجاد نسبة الحجم R_q كما يلي:

$$\frac{Q_s}{Q_1} = R_w \frac{sp \, g \, \eta_1}{sp \, g \, \eta_2}$$

حيث

Q_s = تدفق السحب بواحدات الحجم.

Q_1 = تدفق المائع المحرك بواحدات الحجم.

تصميم محور المضخة

معييار التصميم

إجهاد الانحناء: يمكن حساب إجهادات الفتل في المحور بتطبيق المعادلتين التاليتين:

$$S_s = \frac{16T}{D_o^2} \quad \text{للمحاور المصمتة}$$

$$S_s = \frac{16T}{D_o^2(1 - D^4/D_o^4)} \quad \text{للمحاور المفرغة}$$

حيث

$$S_s = \text{إجهاد قص الفتل، lb/in}^2$$

$$T = \text{العزم المنقول، lb.in}$$

$$D = \text{قطر المحور الداخلي (من أجل المحاور المفرغة فقط)، in}$$

$$D_o = \text{قطر المحور الخارجي، in}$$

تعتمد قيمة إجهاد القص المسموح به على نوع المعدن الذي سيصنع منه المحور، وفيما إذا كان معرّضاً أيضاً لحمولات أخرى، مثل الانحناء أو الضغط. يجب أن يكون عامل أمان التصميم للمحور مساوياً أو أكبر من المركبات الأخرى التي سيتعرض لها.

السرعة الحرجة: تحدد السرعة الحرجة لمحور عبر تحديد الانحراف أو التشوه له، أو "sag" تدلي المحور في الوضع الأفقي تحت تأثير وزنه فقط، حيث يعتبر هذا التدلي هو المعيار الأصغر، بينما تعتبر السرعة الحرجة هي المعيار الأكبر. وعملياً ستكون للمحاور الطويلة والرفيعة سرعة حرجة منخفضة، بينما ستكون للمحاور القصيرة وذات الأقطار الكبيرة سرعة حرجة عالية جداً، ويعطى الانحراف لمحور بسيط التثبيت وفق العلاقة:

$$y = \frac{5wL^4}{384EI} = \text{انحراف (تشوه) المحور}$$

لاحظ أن:

$$I = \frac{\pi D_o^4}{64} \quad \text{للمحاور المصمتة}$$

$$I = \frac{\pi(D_o^4 - D^4)}{64} \quad \text{للمحاور المفرغة}$$

حيث

w = وزن المحور لكل واحدة طول، lb/in.

L = الطول بين المدحرجات التي يستند عليها المحور، in.

E = معامل يونغ، psi.

I = عزم العطالة، in⁴.

و بمعرفه الانحراف أو التشوه العمودي للمحور، فإنه من الممكن حساب السرعة الحرجة الأولى من المعادلة:

$$N_{crit} = 187 \sqrt{\frac{1}{y}}$$

والتي تعبر عن السرعة الحرجة مباشرةً بعدد الدورات في الدقيقة rpm للمحور الدوار.

حسابات استطاعة المضخة

استطاعة الخرج

يمكن إيجاد استطاعة الماء (Whp) أو العمل المفيد المنجز بتطبيق العلاقة:

$$whp = \frac{\text{الارتفاع الكلي بالقدم من السائل} \times \text{min} / \text{من السائل المضخوخ lb}}{33,000}$$

كتلة نوعية مساوية 33,000

إذا كان للسائل ثقلاً نوعياً مساوياً للواحد ووزناً نوعياً مساوياً للقيمة 62.3 lb/ft³ عند درجة الحرارة 68 °F، عندها ستصبح المعادلة كما يلي:

$$whp = \frac{\text{gpm} \times \text{head, ft}}{3960}$$

استطاعة الدخل

يمكن إيجاد استطاعة الكبح المطلوبة لتحريك المضخة عبر تطبيق المعادلة:

$$bhp = \frac{gpm \times \text{total head, ft}}{3960 \times \text{pump efficiency}}$$

حيث نحصل على مردود المضخة من المعادلة التالية:

$$\text{مردود المضخة} = \frac{\text{الخروج}}{\text{الدخل}} = \frac{whp}{bhp}$$

وتعطي الاستطاعة الكهربائية (ehp) المقدمة للمحرك بالعلاقة:

$$\begin{aligned} ehp &= \frac{bhp}{\text{motor efficiency}} \\ &= \frac{gpm \times \text{head, ft}}{3960 \times \text{pump efficiency} \times \text{motor efficiency}} \end{aligned}$$

وتعطي استطاعة الدخل للمحرك بالكيلو واط كما يلي:

$$\begin{aligned} \text{kW input} &= \frac{bhp \times 0.746}{\text{motor efficiency}} \\ &= \frac{gpm \times \text{head} \times 0.746}{3960 \times \text{pump efficiency} \times \text{motor efficiency}} \end{aligned}$$

مردود المضخة

يعطي مردود المضخة بالعلاقة التالية:

$$\text{pump efficiency} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{whp}{bhp}$$

ومن أجل مضخة مقادة بمحرك كهربائي فإنه يمكن إيجاد المردود الإجمالي كما يلي:
المردود الإجمالي = مردود المضخة × مردود المحرك.

وإن من المطلوب في العديد من المواصفات أن يستخدم محرك عمل فعلي خاص بالمضخة خلال اختبارات حقليّة أو في المتجر. واعتماداً على هذا النوع من الاختبار فإن المردود الكلي هنا يأخذ تسمية شائعة حيث يسمى مردود سلك إلى ماء (wire to - to water efficiency) ويعطى بالعلاقة:

$$\text{Overall efficiency} = \frac{\text{whp}}{\text{ehp input}} = \frac{\text{whp}}{\text{ehp}}$$

كيف تشكّل جداول أنابيب الفولاذ

استخدم المعادلة التالية لتشكيل سماكات الأنابيب المطلوبة والمعادن وحجم الأنابيب الاسمي من أجل استخدامه في تطبيق عملي.

$$t_m = \frac{PD}{2S + 2yP} + C$$

حيث

t_m = سماكة الجدار الأصغرية، in. وإذا أوجدت السماكة الاسمية أضف إليها 1.25 % لتغطية تسامحات المعمل.

P = الضغط الداخلي الأعظمي، psig، عند درجة حرارة العمل (التشغيل).

D = قطر الأنبوب الخارجي، in.

S = الإجهاد المسموح به عند درجة حرارة التشغيل (العمل)، psi، ويؤخذ من المراجع الهندسية.

C = تسامح للاستقرار الإنشائي فقط، خذ تسامحاً إضافياً للتآكل من الجدول التالي:

الجدول 10.3

0.065	أنبوب محلزن (وأصغر 3/4-in)
عمق الحلزنة	أنبوب محلزن (وأكبر 1-in)
عمق التعديد	أنبوب مخدّد
0.065	أنبوب غير محلزن النهاية (وأصغر 3 1/2-in)
0.000	أنبوب غير محلزن النهاية (وأكبر 4-in)

y = معامل درجة الحرارة والمعدن:

الجدول 10.4

درجة الحرارة، °F						
نوع الفولاذ	تحت 900	950	1000	1050	1100	فوق 1150
فريتي	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
أوستينيتي	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

ابحث الآن في جدول خصائص الأنابيب واستخرج الأنبوب الذي يملك السماكة الأكبر مباشرة من السماكة المحسوبة، وأعد تفقد وفحص مجالات الضغط ودرجات الحرارة باستخدام أبعاد الأنبوب الفعلي. وباستخدام ID للأنبوب الفعلي أعد تفحص الضياعات الهيدروليكية.

تقدير وزن الأنبوب تبعاً لكل قدم من الطول

احصل أولاً على القطر الداخلي مقدراً بالإنش من المعادلة:

$$ID = OD - 2t$$

حيث

ID = القطر الداخلي للأنبوب، in.

OD = القطر الخارجي للأنبوب يؤخذ من الجدول، in.

t = سماكة جدار الأنبوب وتؤخذ من الجدول، in.

عندها:

$$Wt/ft \text{ of length} = 0.85 \pi (OD^2 - ID^2)$$

معادلات الجريان الصفحي والمضطرب في الأنابيب

توجد هنا 21 معادلة - ستة للجريان المضطرب و 15 للجريان الصفحي للموائع داخل الأنابيب - تعبر عن الجريان داخل أنبوب موضوعة في الجدول 10.5. وتؤمن هذه المعادلات تحويلات سهلة عند معرفة متغيرات مختلفة عن الجريان، وهذه المتغيرات هي طول الأنبوب، سرعة المائع، قطر الأنبوب، ضياعات الضغط، معدل التدفق، عامل الاحتكاك، السرعة المطلقة.

مصطلحات ورموز

$$cP (\text{lb.s/ft}^2) = cSt$$

d = قطر الأنبوب الداخلي، in.

D = قطر الأنبوب الداخلي، ft.

f = عامل الاحتكاك، لا بعدي.

g = الجاذبية الأرضية، 32.2 ft/s^2 .

H_L = ضياعات الارتفاع، ft.

L - طول الأنبوب، ft.

L_{in} - طول الأنبوب، in.

Δp - ضياعات الضغط، psi.

ΔP - ضياعات الضغط، psf.

q - التدفق، gal/min.

Q - التدفق، ft³/s.

Q_{in}^3 - التدفق، in³/s.

R_e = رقم رينولدز $\rho DV/\mu$ واحداته النموذجية:

$3162 q/dv_{cst}$ gal/min, in, cSt

$50.6 q\gamma/d\mu_{cp}$ gal/min, lb/ft³, in, cP

$\gamma DV/g\mu$ lb/ft³, ft, ft/s, lb.s/ft²

v - سرعة المائع، in/s.

V - سرعة المائع، ft/s.

μ - اللزوجة المطلقة، lb.s/ft².

$\nu = \mu/\rho$ ، اللزوجة الحركية، ft²/s.

ρ - كثافة الكتلة، slugs/ft³ = lb.s²/ft⁴.

γ - كثافة الوزن، lb/ft³.

ϵ/D - الخشونة النسبية لجدار الأنبوب، قيم ϵ ، ft، للأنايبب المسحوبة 5×10^{-6} ، الفولاذ أو الحديد المطاوع 150×10^{-6} ، D = القطر الداخلي.

$$H_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{المصعد فقط} \quad H_L = 32 \frac{\mu L V}{\rho g d^3} \quad \text{مخوقات هامة} \quad \text{الزيت فقط} \quad (= 55 \text{ lb/ft}^2)$$

المختبر

L	V	D	ΔP	Q	f	μ	ضائع المصط	المعادلات	السرعة	النفق
							لكلا الزيتين			

ft	ft	in	psi	$\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$	—	—	$\Delta P = f \frac{L}{d} V^2 \times 0.072$	$V = \sqrt{\frac{d \Delta P}{f L}} \times 3.73$	$Q = \sqrt{\frac{d^5 \Delta P}{f L}} \times 0.0203$
ft	ft	in	psi	gal/min (q)	—	—	$\Delta P = f \frac{L}{d^5} q^2 \times 0.0123$	$V = \sqrt{\frac{d \Delta P}{f L}} \times 3.73$	$q = \sqrt{\frac{d^5 \Delta P}{f L}} \times 9.1$

الزيتان المصعد فقط

ft	ft	in	psi	$\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$	—	cSt	$\Delta P = v \frac{L}{d^2} V \times 0.0006$	$V = \frac{d^2 \Delta P}{v L} \times 1670$	$Q = \frac{d^4 \Delta P}{v L} \times 9.1$
ft	ft	in	psi	gal/min	—	cSt	$\Delta P = v \frac{L}{d^2} q \times 2.45 \times 10^{-4}$	$V = \frac{d^2 \Delta P}{v L} \times 1670$	$q = \frac{d^4 \Delta P}{v L} \times 4080$
in	in	in	psi	$\frac{\text{in}^3}{\text{s}}$	—	$\frac{\text{lb} \cdot \text{s}}{\text{in}^2}$	$\Delta P = \mu \frac{L}{d^2} Q_m \times 40.75$	$V = \frac{d^2 \Delta P}{\mu L} \times 0.0312$	$Q_m = \frac{d^4 \Delta P}{\mu L} \times 0.0245$
ft	ft	in	lb/ft ²	$\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$	—	$\frac{\text{lb} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2}$	$\Delta P = \mu \frac{L}{D^2} V \times 32$	$V = \frac{D^2 \Delta P}{\mu L} \times 0.0312$	$Q = \frac{D^4 \Delta P}{\mu L} \times 0.0248$
ft	ft	ft	lb/ft ²	gal/min	—	$\frac{\text{lb} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2}$	$\Delta P = \mu \frac{L}{D^2} q \times 0.091$	$V = \frac{D^2 \Delta P}{v L} \times 0.0312$	$q = \frac{D^4 \Delta P}{v L} \times 11$

المعادلات الجريان ضمن الأنابيب الجدول 10.5

معادلات جريان الهواء ضمن الأنابيب والصمامات ولوازمها

ينشر الصانعون معادلات مختلفة لجران الهواء، وسنورد هنا عشرة معادلات والبيانات التي تعرف هذه المعادلات، مع معادلات التحويل (الجدولين 10.6 و 10.7)، وعند استخدام أي معادلة من هذه المعادلات في عملية التصميم فإنها ستعطي نتائجاً معقولة ومقبولة.

مصطلحات ورموز

Q = جريان الهواء بواحدات قياسية، (scfm (14.7 psi, 68 °F).

q = جريان الهواء بشروط حقيقية، (cfm. $Q = q (P/14.7) (528/T)$).

V = السرعة، ft/s (متوسطة خلال الصمام).

P = الضغط بواحدات مطلقة، psia (الدليل D = قبل المقياس، U = بعد المقياس).

p = الضغط المقاس، psi.

ΔP = انخفاض الضغط، psi.

r = نسبة الضغط P_D/P_U .

ρ = الكتلة، lb/ft³.

G = الثقل النوعي، P_{gas}/P_{air} .

T = درجة الحرارة المطلقة، °R = °F + 460.

A = مساحة الدخول للأنبوب، in².

D_e = القطر المكافئ للنافورة حادة الحافة، in (معامل التصريف $C_D = 0.6$).

M = الوزن المولي، lb ($M = 29$ lb for air).

W = التدفق الوزني للماء، lb/s.

C_v, K, F, D_o = معاملات تدفق نموذجية (وتدعى أيضاً ثوابت التدفق وعوامل التدفق) تستخدم في معادلة التدفق.

الجدول 10.6 معلومات الصانعين لأدوات أو أجهزة جريان الهواء

معامل التدفق	العنصر	معادلة التعريف
$C_v = 1.26$	صمام يدوي	$C_v = \frac{Q \times 60}{1360} \sqrt{\frac{G T_U}{\Delta P \times P_U}}$
$D_o = 0.25$	مخفض ضغط	$D_o = \sqrt{\frac{Q}{33 P_U} \times \frac{1}{\sqrt{r(r^{0.43} - r^{0.71})}}}$
F غير معروف	صمام تحكم	$F = \frac{Q}{P_U \sqrt{8/5}} \sqrt{\frac{1}{r(1-r)(3-r)}}$
محرك هوائي $Q = 250 \text{ scfm}; P = 600 \text{ psia}$ (معطى)		

	D_p	C_v	F	K		
				$r = 1.0$	$r = 0.75$	$r = 0.5$
D_p		$= 0.236 \sqrt{C_v}$	$= 0.316 \sqrt{F}$	$= 1.456 \frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$	$= 1.521 \frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$	$= 1.641 \frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$
C_v	$= 18.0 D_p^2$		$= 1.8 F$	$= 38.2 \frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 41.5 \frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 48.3 \frac{A}{\sqrt{K}}$
F	$= 10 D_p^2$	$= 0.556 C_v$		$= 21.2 \frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 23.1 \frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 26.9 \frac{A}{\sqrt{K}}$
$r = 1.0$	$= 4.5 \frac{A^2}{D_p^2}$	$= 1460 \frac{A^2}{C_v^2}$	$= 450 \frac{A^2}{F^2}$			
$K, r = 0.75$	$= 5.36 \frac{A^2}{D_p^2}$	$= 1725 \frac{A^2}{C_v^2}$	$= 534 \frac{A^2}{F^2}$			
$r = 0.5$	$= 7.29 \frac{A^2}{D_p^2}$	$= 2330 \frac{A^2}{C_v^2}$	$= 724 \frac{A^2}{F^2}$			

لاحظ = يتغير العامل K مع r و A ، ويجب عليك معرفة أي قيمة استخدموا المصنع لاستخراج قيمة K .
 فمثلاً إذا أخذ K عند $r = 0.75$ ومساحته ودخول للمصام $A = 0.2$ عندها $4.60 \sqrt{A} = 0.231 \times 0.2 \sqrt{A}$

الجدول 10.7 معدلات التحويل بين متغيرات جريان الهواء

معادلة الحريان (درجة بويلا ما) (الانحراف = 0) $\text{scfm} = \sqrt{\text{ft}^3/\text{min}}$	تعريف معامل التدفق
$Q = 33 D_v^2 P_v \sqrt{r(r^{0.43} - r^{0.57})}$	D_v = مكافئ القطر خارجي للأنبوب معامل التدفق $C_D = 0.6$
$Q = \frac{963}{60} C_v \sqrt{\frac{\Delta P (P_u + P_d)}{GT_u}}$	C_v = معامل الصمام
$Q = \frac{1360}{60} C_v \sqrt{\frac{\Delta P \times P_d}{GT_u}}$	C_v = معامل التدفق
$Q = \frac{1390}{60} C_v \sqrt{\frac{\Delta P \times P_d}{GT_u}}$	C_v = عامل السهم
$Q = \frac{5180}{60} C_v \sqrt{\frac{P_u^2 - P_d^2}{MT_u}}$	C_v = معامل التدفق ضمن الصمام
$Q = \frac{963}{60} C_v \sqrt{\frac{P_u^2 - P_d^2}{GT_u}}$	C_v = معامل التدفق

المجموع 10.8 معادلات جريان الموائع الانتموزجية

معادلة الحريك (درجة دونا عا) ($m = 0$)، فاسم، $(m = 0)$	نصيرب معادل البدق	
$Q = \frac{2.32^{m=0}}{60} C_g \frac{\Delta P_{0.043} \times P_{0.0}^{0.0}}{\sqrt{GT_p/1520}}$	$C_g =$ معادل حريك البقر	$= \frac{Q \times 60}{(2.32^{m=0})} \times \frac{\sqrt{GT_p/1520}}{\Delta P_{0.043} \times P_{0.0}^{0.0}}$
$Q = F P_{0.0} \sqrt{\frac{4}{3} \sqrt{1-r^2}}$	$F =$ معادل حريك #1	$= \frac{Q}{P_{0.0} \sqrt{4/3} \sqrt{1-r^2}}$
$Q = F P_{0.0} \sqrt{\frac{8}{3} \sqrt{r(1-r)(3-r)}}$	$F =$ معادل حريك (#2-better) NBS	$= \frac{Q}{P_{0.0} \sqrt{8/3} \sqrt{r(1-r)(3-r)}}$
$Q = 38.1 P_{0.0} \sqrt{\frac{1-r}{K}}$	$K =$ المعامل	$= \frac{26}{P_{0.0}^2} \Delta P$

Taken from catalog.

الجدول 10.8 معادلات جريان الهواء التمزجية /تابع/

انظمة امتصاص الهواء في محركات الاحتراق الداخلي

إن أول خطوة في تصميم نظام امتصاص الهواء لمحرك احتراق داخلي هي معرفة كمية الهواء المطلوبة للاحتراق، وتعطى كمية الهواء المطلوبة بالمكعب في الدقيقة بالعلاقة التالية:

$$\text{الهواء المطلوب} = \frac{B^2 S \times rpm \times N}{2200K}$$

حيث

B - قطر الاسطوانة، in.

S - شوط المكبس، in.

rpm - سرعة دوران المحرك، rpm.

N - عدد الاسطوانات.

K = ثابت. لثنائي الشوط = 1، لرباعي الشوط = 4.

سيتغير المردود الحجمي مع تصميم المحرك ولكن يمكن أخذ متوسط 80 % لتحديد حجم مصفاة الهواء.

الأساسات لمحركات الاحتراق الداخلي

يعتبر تصميم الأساسات هاماً جداً عند التحضير لتركيب محركات الاحتراق الداخلي، إذ يعتمد حجم وكتلة الأساسات على أبعاد ووزن المحرك والمولد أو المضخة إذا كانت منشآت إدارة مضخة. ويجب عليك اتباع هذه القيم الأساسية على الأقل:

1. يجب أن يستوعب العرض عرض الجهاز مع عرض إضافي وطول إضافي على الأقل قدم واحد.
2. يجب أن يكون العمق كافياً لتأمين وزن من الاسمنت مساوٍ لـ 1.3 إلى 1.5 مرة من وزن الجهاز، ويحدد هذا العمق وفق العلاقة:

$$H = \frac{(1.3 - 1.5)W}{LB \times 135}$$

حيث

H = عمق الأساس، ft.

L = طول الأساس، ft.

B = عرض الأساس، ft.

135 = كثافة الاسمنت، lb/ft³.

W = وزن الجهاز المراد تثبيته.

3. يجب أن لا يتجاوز حمل الجلوس على التربة المواصفات القياسية للبناء، ويعطى حمل الجلوس (التوضع) بالعلاقة:

$$\text{حمل التوضع} = \frac{(2.3 - 2.5)W}{BL}$$

حيث

W = وزن الجهاز.

B = عرض الأساس، ft.

L = طول الأساس، ft.

11

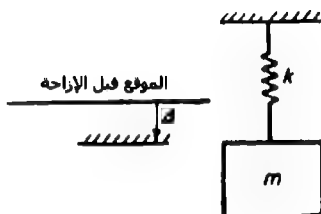
الاهتزازات

الرموز المستخدمة

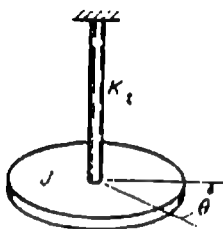
الجدول 11.1

الاهتزاز الفتلي		الاهتزاز المستقيم		Item
الواحدة	الرمز	الواحدة	الرمز	
s	t	s	t	الزمن
rad	θ	m	x	الإزاحة
rad/s	$\dot{\theta}$	m/s	\dot{x}	السرعة
rad/s ²	$\ddot{\theta}$	m/s ²	\ddot{x}	التسارع
Nms ² (or) kg m ²	J	kg	m	الكتلة العطالية
Nm (or) kg m ² /s ²	k_t	N/m (or) kg/s ²	k	ثابت صلابة النابض
Nms (or) kg m ² /s	c_t	Ns/m (or) kg/s	c	معامل التخميد
rad/s	ω_n	rad/s	ω_n	التردد الزاوي الطبيعي
Hz	f_n	Hz	f_n	التردد الطبيعي

الاهتزازات الحرة غير المتخمدة



الشكل 11.1 نظام نابض - كتلة



الشكل 11.2 نظام اهتزاز فتل

المعادلة التفاضلية لحركة النظام المهتز

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad J\ddot{\theta} + k_t\theta = 0$$

دور الاهتزاز الطبيعي

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \tau = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k_t}}$$

حيث

$$k = \frac{W}{\Delta} \quad k_t = \frac{\pi G d^4}{32L}$$

التردد الزاوي الطبيعي للنظام

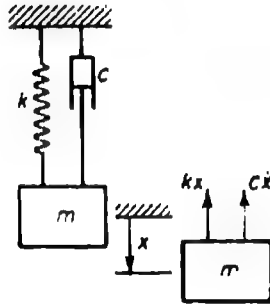
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k_t}{J}}$$

التردد الطبيعي

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_t}{J}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

الاهتزازات الحرة المتخامدة



الشكل 11.3 اهتزازات حرة مع تخميد لزوج

المعادلة التفاضلية للحركة

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

الحل العام للاهتزاز الحر المتخامد

$$x = Ae^{s_1 t} + Be^{s_2 t}$$

حيث تعتبر A و B ثوابت مساعدة تعتمد قيمها على الشروط الابتدائية.

بينما تتحدد قيمتي s_1 و s_2 وفق المعادلة:

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \\ &= \{-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\} \omega_n \end{aligned}$$

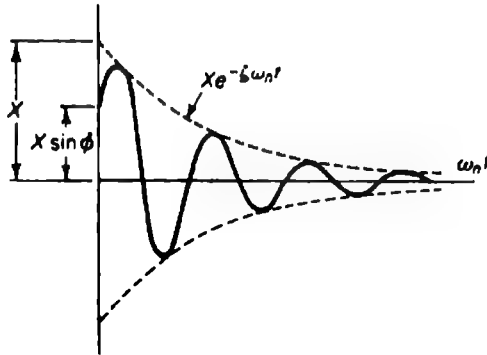
حيث

ζ = نسبة التخميد.

$$c/c_c =$$

$$2\sqrt{km} = 2m\omega_n = c_c \text{ - التخمد الحرج}$$

الاهتزازات المتخامدة عندما $\zeta < 1$:



الشكل 11.4

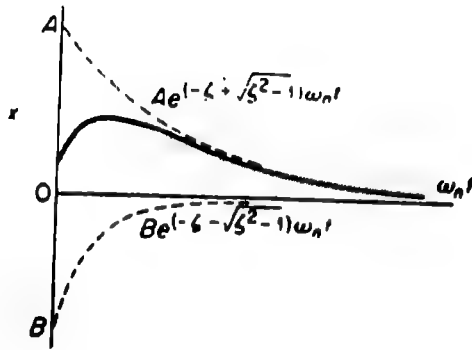
وتعطي معادلة الحل العام لنظام مخمد:

$$\begin{aligned} x &= e^{\zeta \omega_n t} (A e^{i\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t} + B e^{-i\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t}) \\ &= X e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \phi) \end{aligned}$$

ويعطى التردد للاهتزاز المتخامد بالعلاقة:

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n$$

أما إذا كان $\zeta > 1.0$ فيمكن عندها أن تأخذ الحركة الشكل التالي عند الشروط الابتدائية x_0 و y_0 :



الشكل 11.5

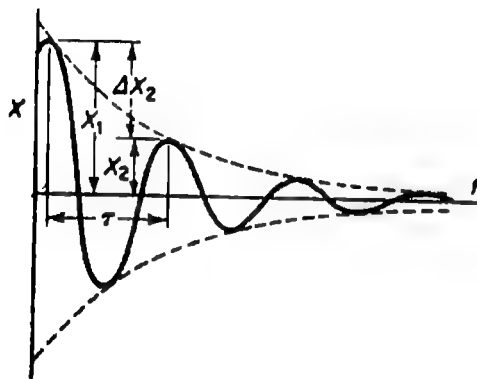
ويعطى الحل العام لنظام مع فرط تخميد كما في المعادلة:

$$x = Ae^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + Be^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t}$$

أما عندما تكون $\zeta = 1.0$ فيسمى عندها تخميد حرج، ويعطى الحل كما يلي:

$$x = (A + Bt)e^{-\omega_n t}$$

وإذا كان التناقص لوغاريتمياً فتعطى معادلة الحركة كما في الشكل التالي



الشكل 11.6

وتعطي نسبة السعتين كما يلي:

$$\begin{aligned}\delta &= \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{e^{-\zeta \omega_n (t_1 + \tau)}} \\ &= \ln e^{\zeta \omega_n \tau} = \zeta \omega_n \tau \\ &= \frac{2\pi \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{1}{n} \ln \frac{x_0}{x_n} = \frac{\Delta U}{U}\end{aligned}$$

حيث

$$\tau = \text{دور الاهتزاز المتخامد} = 2\pi / \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

x_n = السعة بعد انقاس n هزة.

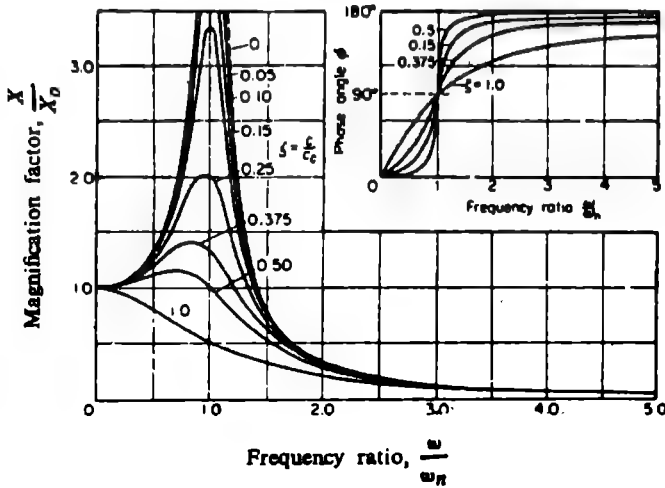
ΔU : الطاقة المبددة خلال دور.

U : الطاقة الاهتزازية.

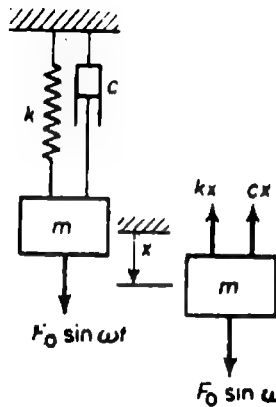
$$1/2 K x^2 = U_i$$

الاهتزازات القسرية

أ. حل الحالة الثابتة مع تخميد لزج



الشكل 11.8



الشكل 11.7 الاهتزاز القسري مع تخميد لزج.

المعادلة التفاضلية لحركة نظام كتلة - نابض مع تخميد لزج:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$$

حيث تعتبر ω تردد القوة القسرية.

يعطى الحل العام للمعادلة السابقة بالعلاقة:

$$x = X_1 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \phi) + \frac{F_0 \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

ويعطى حل الحالة الثابتة للمعادلة التفاضلية السابقة بالعلاقة:

$$x = \frac{F_0 \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

عامل التكبير يعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned} \frac{X}{X_0} &= \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^2}} \end{aligned}$$

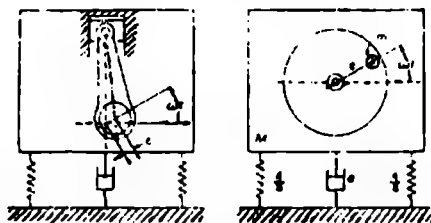
بينما تعطى زاوية الطور بالعلاقة:

$$\tan \phi = \frac{\frac{c\omega}{k}}{1 - \frac{m\omega^2}{k}} = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

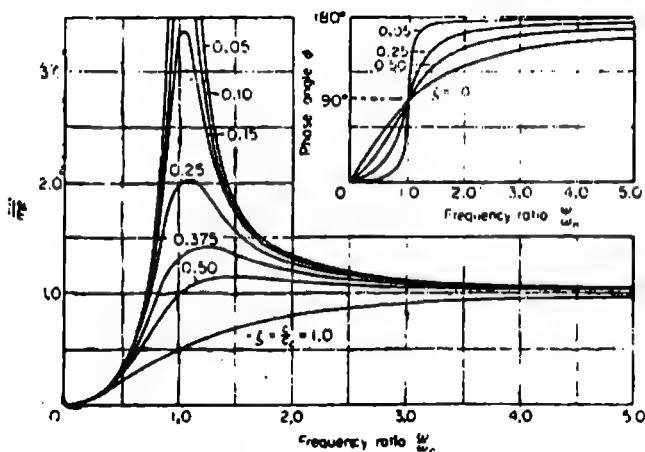
حيث

$X_o = \frac{F_o}{k}$ = الاستطاعة عند التردد الصفري لنظام كتلة - نابض تحت تأثير قوة ثابتة F_o .

ب - عدم التوازن الدوراني والترددي



الشكل 11.9



الشكل 11.10

تعطى المعادلة التفاضلية للنظام كما يلي:

$$M \ddot{x} + c\dot{x} + kx = (m\omega^2) \sin \omega t$$

وتعطى السعة كما يلي:

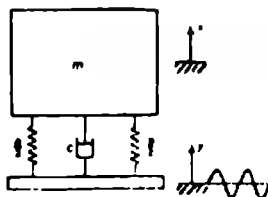
$$\begin{aligned} X &= \frac{m\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \\ &= \frac{\frac{m}{M} e \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right\}^2}} \end{aligned}$$

بينما تعطى زاوية الطور (الشكل 11.10) كما يلي:

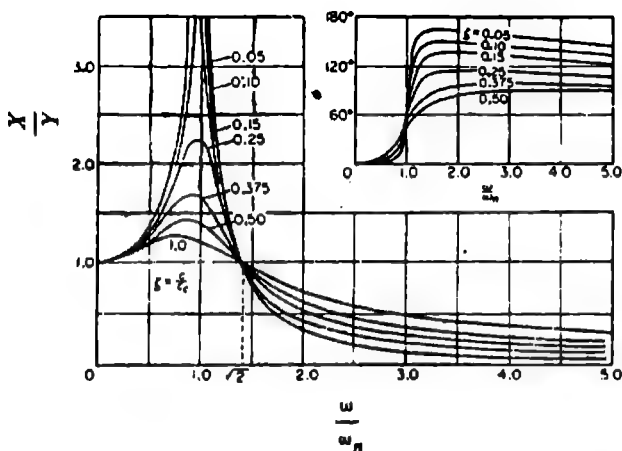
$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$$

$$= \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

ج - حالة اهتزاز القاعدة (تهيج القاعدة)



الشكل 11.11



الشكل 20.15

تعطى المعادلة التفاضلية للنظام كما يلي:

$$M \ddot{x} + c \dot{x} + kx = ky + cy$$

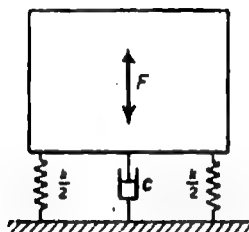
وتعطى القيمة المطلقة لنسبة الاستطاعة (الشكل 11.12) بالعلاقة:

$$\begin{aligned} \frac{X}{Y} &= \sqrt{\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \\ &= \frac{1 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2} \end{aligned}$$

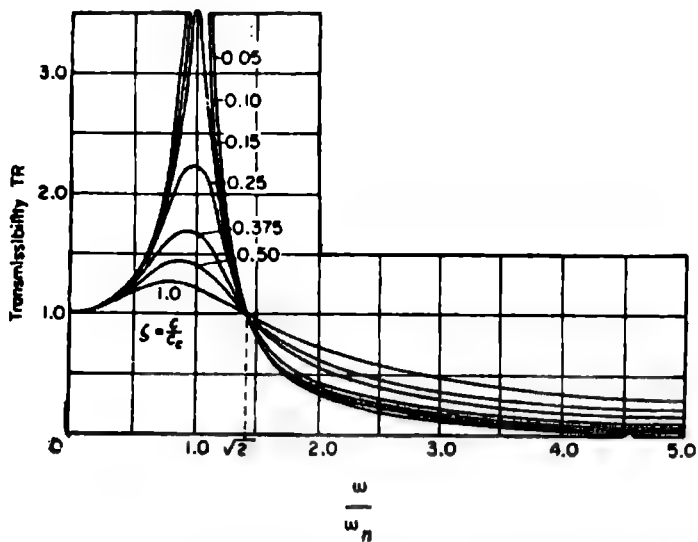
بينما تعطى معادلة زاوية الطور كما يلي:

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{m c \omega^3}{k^2 \left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\} + (c\omega)^2} \\ &= \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2} \end{aligned}$$

د - عزل الاهتزاز



الشكل 11.13



الشكل 11.14

تعطى القوة المنتقلة عبر النوابض والمخمّد بالعلاقة:

$$F_T = \frac{F_o \sqrt{1 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1 - \frac{m\omega^2}{k}\right\}^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}}$$

$$= \frac{F_o \sqrt{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

وتعطى قابلية الانتقال TR كما يلي:

$$TR = \frac{\sqrt{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

وعندما يكون التخميد مهمل عندها تعطى قابلية الانتقال بالعلاقة:

$$TR = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 1}$$

$$= \frac{1}{\frac{(2\pi f)^2 \Delta}{g} - 1}$$

حيث

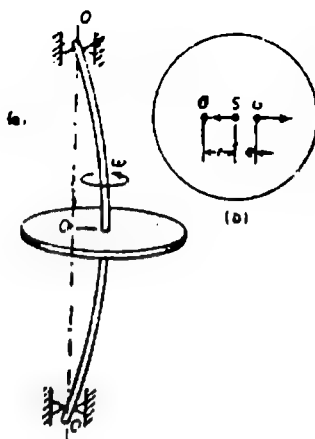
Δ = الانزياح الستاتيكي للنظام.

هـ - تدويم المحاور الدوارة

تدويم محور فيه عدم توازن.

يعطى الانحراف الديناميكي بالعلاقة:

$$r = \frac{m\omega^2 e}{k - m\omega^2} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 e}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$



الشكل 11.15

حيث

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ التردد الطبيعي للاهتزاز العرضي للمحور والقرص عند سرعة صفرية.
وتعطي السرعة الحرجة للمحور بالعلاقة:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

وتعطي السرعة الحرجة لنظام محور متعدد الدوارات عبر معادلة Dunkerely:

$$\frac{1}{\omega_c^2} = \frac{1}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \dots + \frac{1}{\omega_i^2} \dots$$

حيث

ω_s = السرعة الحرجة للمحور لوحده.

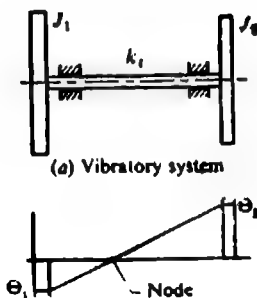
ω_1 = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_1 فقط.

ω_2 = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_2 فقط.

ω_i = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_i فقط.

الاهتزازات الفتلية

١ - نظام فيه قرصين



الشكل 11.16

وتعطى معادلتى الحركة للدوارين كما يلي:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + k_t \theta_1 - k_t \theta_2 = 0$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + k_t \theta_1 - k_t \theta_2 = 0$$

وتعطى معادلة التردد كما يلي:

$$\omega^2 \left\{ \omega^2 - \left(\frac{k_t}{J_1} + \frac{k_t}{J_2} \right) \right\} = 0$$

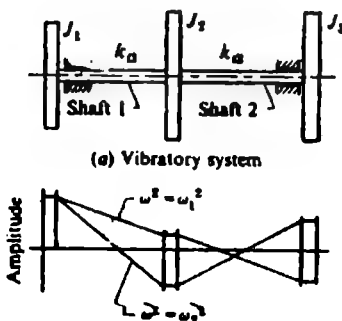
وتعطى الترددات الطبيعية للنظام كما يلي:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{n1} = 0 \\ \omega_{n2} = \sqrt{k_t \left\{ \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} \right\}} \end{array} \right.$$

ونسبة السعة للأنماط الأساسية:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{k_1}{k_1 - J_2 \omega^2} = \frac{k_1 - J_2 \omega^2}{k_1}$$

ب - نظام فيه ثلاثة أقراص



الشكل 11.17

الأنماط الرئيسية للاهتزاز $\omega_1^2 < \omega_2^2$.

تعطى معادلات الحركة كما يلي:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + k_{t1}(\theta_1 - \theta_2) = 0 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + k_{t1}(\theta_1 - \theta_2) + k_{t2}(\theta_2 - \theta_3) = 0 \\ J_3 \ddot{\theta}_3 + k_{t2}(\theta_3 - \theta_2) = 0 \end{cases}$$

وتعطى المعادلة الترددية التي تحدد الترددات الطبيعية لنظام بثلاث أقراص كما يلي:

$$\omega^2 \left\{ \omega^2 - \left[k_{f1} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) + k_{f2} \left(\frac{1}{J_2} + \frac{1}{J_3} \right) \right] \omega^2 \right. \\ \left. + k_{f1} k_{f2} \frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_1 J_2 J_3} \right\} = 0$$

ونسب السعات للأنماط الرئيسية للاهتزاز:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{k_{f1}}{k_{f1} - J_1 \omega^2}$$

$$\frac{\theta_2}{\theta_3} = \frac{k_{f2} - J_3 \omega^2}{k_{f1}^2}$$

الملحق

الخواص الميكانيكية لحديد الصب مع غرافيت كروي

النوع (1)	متانة الشد الأصغرية (2)	نسبة الاستطالة الصغرى (3)	مجال قساوة برينيل النموذجية (4)	التركيب الأساسي ومجال التطبيق (5)
SG 800/2	800	2	248-352	برلينج أو مراجع، له قوة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 700/2	700	2	229-302	مكون من البرليت، له قوة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 600/3	600	3	192-269	مكون من البرليت والفريت، له متانة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 500/7	500	7	170-241	مكون من البرليت والفريت، له متانة شد متوسطة مع مطيلية معقولة.
SG 400/12	400	12	201, Max	مكون من الفريت، له متانة شد متوسطة مع مطيلية وصلابة كبيرتان نسبياً.
SG 370/17	370	17	179, Max	مكون من الفريت، وهو مقاوم عالي للصدم.

الخواص الميكانيكية لحديد الصب الرمادي

النوع	متانة الشد الأصفرية	قساوة برينيل
(See IS: 4843-1968)	(N/mm ²)	(HIB)
FG 150	150	130 to 180
FG 200	200	160 to 220
FG 220	220	180 to 220
FG 260	260	180 to 230
FG 300	300	180 to 230
FG 350	350	207 to 241
FG 400	400	207 to 270

الخواص الميكانيكية للفولاذ ذو مقاومة الشد العالية

النوع	الرمز التصميمي	متانة الشد الأصفرية (MN/m ²)	الانحسوع (0.5) بالمتة) (إجهاد تجريبي)	التناقص الأصفر في المساحة	استطالة طول قياسي $= 5.65\sqrt{50}$	قساوة برينيل الصفري	متانة صدم Izod الصفري (J)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	CS 640	640	390	35	15	190	30
2	CS 700	700	560	30	14	207	30
3	CS 840	840	700	28	12	248	28
4	CS 1030	1030	850	20	8	305	20
5	CS 1230	1230	1000	12	5	355	-

الخواص الميكانيكية والصلادة للفولاذ الكربوني المطروق المستخدم لأهداف هندسية عامة

النوع	الرمز	متانة الشد الأصفرية N/mm ²	إجهاد الخصوع الأصفرى N/mm ²	نسبة الاستطالة $5.65\sqrt{S_0}$	الصلادة الصفري BHIN	درجة حرارة التطبيع C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1 A	15 C 8	410	220	25	110	880-910
2	20 C 8	430	230	24	120	880-910
2 A	25 C 8	460	250	22	130	880-910
3	30 C 8	490	270	21	140	860-890
3 A	35 C 8	540	280	20	155	850-880
4	45 C 8	620	320	15	175	830-860
5	55 C 8	710	350	13	200	810-840
6	65 C 6	740	370	10	210	800-830

ملاحظة: لقد أخذت الخصائص الموجودة في هذا الجدول لعينة على شكل قضيب بقطر 100 MM مطروق ومطبيع وتم الاختيار وفق اتجاه استطالة الحبيبات.

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني

الاستخدامات المقترحة (8)	قسارة تربيتل (HB) No.	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$) ولمبة اختبار دائرية)	إجهاد المنخفض N/mm ²	متانة الشد /mm ²	% Mn	% C	التسمية (وفق ISI)
	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
تشكيل على البارد وسحب عميق، جيد الحواف يستخدم في هياكل السيارات والرافعات، يستخدم المظلم منه في المطروقات.	-	27	196	314-392	0.50 max	0.12 max	C 07
نفس الاستخدام	-	26	206	333-412	0.30-0.60	0.15 max	C 10
أعمدة الكامات، الكامات، المسننات خفيفة الأداء، المسننات الدودية، بسر الكبس المحاور، المقاطعات، دواليب السلاسل، الفخازات... الخ.	137	26	216	363-441	0.40-0.70	0.10-0.18	C 14
الرافعات العاملة على البارد	137	25	235	363-481	0.30-0.60	0.20 max	C 15
للمنصر ذات الإجهاد المنخفض	163	25	245	412-490	0.60-0.90	0.10-0.20	C 15 Mn 75
ولأهداف العامة.							
للمنصر ذات الإجهاد المنخفض	156	24	245	432-510	0.60-0.90	0.15-0.25	C 20
ولأهداف العامة.							
للمنصر ذات الإجهاد المنخفض	170	27	275	432-520	0.30-0.60	0.20-0.30	C 25
ولأهداف العامة.							

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني /تابع/

الاستخدامات المقترحة (8)	قسارة تربتل (HB) No.	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$ ولمينة اختيار دائرية)	إجهاد المنخفض N/mm ²	متانة الشد /mm ²	% Mm (3)	% C (2)	النسبة (وفق الهيئة (ISI (1)
للمعاصر ذات الإجهاد المنخفض والأهداف العامة.	207	22	275	461 - 560	0.60 - 0.90	0.20 - 0.30	C25 Mn 75
العتلات المشكلة على البارد، مسامير الربط المقساة والمزاحة، الكابلات الدوراني، المستة، الجلب، أنابيب الفولاذ، ... الخ.	179	21	294	490 - 588	0.60 - 0.90	0.25 - 0.35	C30
للمعاصر المعرضة لإجهادات قليلة، أنابيب السيارة وأذونات الربط.	187	20	304	510-608	0.30 - 0.60	0.30 - 0.40	C35
للأجزاء المعرضة لإجهادات قليلة، إطارات الدراجات والدراجات النارية، عارضات الربط لوصول السكن الخشبية	223	20	314	540 - 637	0.60 - 0.90	1.30 - 0.40	C35 Mn 75
العمود الرققي (الكرنك)، المحاور، محاور الدوران، ومحاور الحاملة، أذرع الدفع وأذرع التوصيل، المحاريط، المراخي، المستات، الخ...	217	18	324	570 - 667	0.60 - 0.90	0.35 - 0.45	C 40

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني /تابع/

الاستخدامات المقترحة (8)	قسارة بريتيل (IIR) No.	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$ وعينة اختبار دائرية)	إجهاد المقصوع N/mm ²	صلابة الشد /mm ²	% Mn	% C	التسمية (وفق الـ ISI)
(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)	
الحاور والبراشي والمستنات وحاور الدوران آلات التشغيل.	229	15	353	618 - 696	0.60 - 0.90	0.40 - 0.50	C 45
الحاور، الحواير، الاسطوانات، الأجزاء المقساة للمستنات الدودية والدورات.	241	13	373	647 - 765	0.60 - 0.90	0.45 - 0.55	C 50
فولاذ السكك الحديدية، البراشي، حاور المستنات، الأفرع المتهزئة وغطات الاسطوانات.	255	11	392	706 (min)	1.00 - 1.10	0.45 - 0.55	C 50 Mn
الحواير، أعمدة المرافق، الاسطوانات، الكامات، المستنات، أسنان المستنات، للأجزاء الراد منها إعطاء مقاومة اهتراء متوسطة.	265	13	392	706 (min)	0.60 - 0.90	0.50 - 0.60	C 55 Mn 75
البراشي والعواصيل المقساة، أعمدة المرافق، الحاور، القارنات، المستنات والأعمدة الدوارة في آلات التشغيل.	255	11	412	736 (min)	0.50 - 0.80	0.55 - 0.65	C 60
عربات القاطرات وإطارات الركبات، نوابض صمامات المحرك، الربذيلات والأختام الدقيقة.	255	10	422	736 (min)	0.50 - 0.80	0.60 - 0.07	C 65

قيم إجهادات الشد والخضوع للفلولاذ الطروق القياسي

النسبة	متانة الشد (N/mm ²)	إجهاد الخضوع الأصغري (N/mm ²)	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$)
(1)	(2)	(3)	(4)
Fe 290	290	170	27
FeE 220	290	220	27
Fe 310	310	180	26
FeE 230	310	230	26
Fe 330	330	200	26
FeE 250	300	250	26
Fe 360	360	220	25
FeE 270	360	270	25
Fe 410	410	250	23
FeE 310	410	310	23
Fe 490	490	290	21
FeE 370	490	370	21
Fe 540	540	320	20
FeE 400	540	400	20
Fe 620	620	380	15
FeE 460	620	460	15
Fe 690	690	410	12
FeE 520	690	520	12
Fe 770	770	460	10
FeE 580	770	580	10
Fe 870	870	520	8
FeE 650	870	550	8

خصائص واستخدامات الفولاذ اخلادطي /تابع/

الاسمىة (1)	ماتية الشد MN/m^2	حد الخضوع MN/m^2	الاستطالة الأصغرية $(\epsilon = 6.55\sqrt{\sigma})$	صلم الأصغري value, Nim	فسارة برينل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(11)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
35 Min 2 Mo 45	785-932	588	16	54.00	229-277	المعدن المرتقي، السلتات، البراضي، وأذرع التوصيل
	882-1030	687	15	54.00	225-311	
40 Cr 1	981-1128	785	13	47.07	285-341	
	678-834	530	18	54.00	201-248	أذرع التوصيل، المستنات، الصفائح المقارومة للأهراء، ... الخ.
	785-932	588	16	54.00	229-277	المخارو، المستنات، البراضي، الجاريطات.
40 Cr 1 Mo 28	882-1030	687	15	54.00	235-311	
	687-834	530	18	54.00	201-248	
	785-932	588	16	54.00	229-277	
	882-1030	687	15	54.00	235-311	
15 Cr 3 Mo 55	981-1128	785	13	47.07	235-341	
	687-834	530	18	54.00	201-248	للأهراء التي تحتاج لسطح عالي الفسارة وطبقة مقارومة للأهراء.
and	785-932	588	16	54.00	229-277	
25 Cr 3 Mo 55	882-1030	687	15	54.00	235-311	

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلاقطي /تابع/

الاسم (1)	مادة الشد MPa/mm ²	حد الخضوع MPa/mm ²	الاستطالة الأصغرية ($\epsilon = 6.55\sqrt{a}$)	صلب الأصغري value, N/mm ²	فسارة برينيل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(11)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
40 Ni 2 Cr 65 Mo 55	1180-1324	981	10	29.42	341-401	للبراغي المبرضة لإجهادات عالية، مستأنات، عوارض، شتبات عدقة... الخ.
	1520 min	1275	6	10.79	444 min	
	981-1128	785	12	47.07	285-341	
	1080-1226	863	11	40.21	311-363	
1520 min	1180-1324	981	10	34.32	341-401	
	1520 min	1275	8	13.73	444 min	

**الخواص الميكانيكية للفولاذ الأوستينيتي المنعّم البنية غير القابل للصدأ
فضبان، صفائح، ألواح، شرائط**

نسبة الاستطالة الوواح، شرائط		نسبة الاستطالة فضبان صفائح		قوة الشد	إجهاد الصمود الأصغري	قساوة برينيل	تسمية الفولاذ
من	من	من	من		20 %		
3 to	0.5	3 to 30	5 to 100				
mm	mm	mm	mm				
(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
40	38	40	40	440 to 650	180	192	02Cr18Ni11
40	38	40	40	490 to 690	200	192	04Cr18Ni10
40	38	40	40	490 to 690	210	192	07Cr18Ni9
40	38	40	-	590 to 780	220	212	10Cr17Ni7
35	33	35	35	490 to 690	210	192	04Cr18Ni10Ti20
35	33	35	35	490 to 690	210	192	04Cr18Ni10Nb40
40	38	40	40	490 to 690	210	192	04Cr17Ni12Mo20
40	38	40	40	440 to 640	200	192	02Cr17Ni12Mo2
35	33	35	35	490 to 690	220	192	04Cr17Ni12Mo2Ti20
40	38	40	40	640 to 830	300	217	10Cr17Mn6Ni14
-	-	40	40	490 to 690	210	-	15Cr24Ni13
-	-	40	40	490 to 690	210	-	20Cr25Ni20

خصائص حديد الزهر القياسي

ملاحظات والاستخدام المقترح	الاستطالة عند 50 mm %	معامل المرونة	رقم قشارة بريتل	حد التحمل في حالة الانحناء، التكرر Mw/m^2	مقاومة التآكل	الاقاومة النهائية MN/m^2	المدن	
		فصل GN/m^2	شد وضغط GN/m^2		ضغط σ_u	شد σ_u		
للكبي الصناعي العام	0-1	28	69-82	100-150	62	557	124	Gray, ordinary
اسطوانات الضخعات	0-1	33	82	100-150	82	690	166	Gray, good
للمسكوبات العامة	0-1	38	96	100-150	103	828	207	Gray, high grade
بديل عن الظروف غير العامة	10	64	160	100-145	173	828	345	Malleable, S.A.E. 32510
إطارات الآلات الخفيفة	1-2	41	103	200	110	828	221	Nickel alloy: Ni-0.75, C-3.40, Si-1.75 Mn0.55,
لاسطوانات الدبرل الثقيلة، الضخعات ومحاك الصمامات، طولات آلات التشغيل الخفيفة.	1-2	55	138	220	138	1080	276	Ni-2.00, C-3.00, Si-1.10, Mn-0.80.
اسطوانات المحركات الخفيفة	1-2	41	103	200	110	862	221	Nickel-chromium alloys: Ni-0.75, C-0.30, C-3.40, Si-1.90, Mn-0.65 Ni-2.75, C-0.80, C-3.00, Si-1.25, Mn-0.60.
قوالب التشكيل الثقيلة.	1-2	55	138	300	152	1103	310	

$\text{GN/m}^2 = (1000/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$
 $\text{1 MN/m}^2 = (1/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$

$$\text{GN/m}^2 = (1000/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$$

$$1 \text{ MN/m}^2 = (1/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$$

الخصائص العامة للورلاذ الحارطي والكربوني /تابع/

الخصائص والاستخدام المقترح	الاستطالة عند 50 mm %	معامل البرونة		رقم قساوة بريتل	حد التحمل في حالة الانحناء المكرر MN/m ² σ _{mn}	إجهاد الخضوع MN/m ² σ _{yp}	قوة شد ومضط σ _{tp}	قوة شد MN/m ² σ _{tu}	قوة شد MN/m ² σ _{tu}	المدن
		قوة G _c /m ²	شد وضغط E G _N /m ²							
(11)	(10)	(9)	(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
للطرق	20	82.0	207	140	289	180	310	414	586	S.A.E. 1045, ملدن
الكثيرة عارء	28 } 15 }	82.0	207	197 248	365 462	241 360	414 621	462 580	655 } 828 }	مسقى بالاء
	22 } 16 }	82.0	207	192 235	365 448	241 310	428 552	462 552	662 } 793 }	مسقى بالزيت
البرايش، أجهزة القطع	20	82.0	207	200	360	228	380	520	760	S.A.E. 1095, ملدن
	16 } 10 }	79.4	207	300 380	470 690	270 520	455 896	586 828	896 } 1300 }	مسقى بالزيت

الخصائص العامة للفرلاذ الجلاطي والكروني /تابع/

المدن	المقاومة النهائية	إجهاد الخضوع	حد التحمل في حالة الإختباء المتكرر	رقم قساسة برينيل	معامل الزرنية	الاستطالة عند	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	شد $\sigma_{0.2}$ MN/m ²	قوى $\sigma_{0.2}$ MN/m ²	شدة وضغط $\sigma_{0.2}$ MN/m ²	(2)	(3)	(4)	(5)
فرلاذ خلاتي	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Nickel: S.A.E. 2320.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
مسقى بالآء	504	380	345	207	338	143	82
مسقى بالآء	965	676	758	448	470	277	18
مسقى بالآء	527	373	332	200	318	140	30
مسقى بالآء	896	621	690	414	345	262	18
مسقى بالآء	655	414	448	262	365	183	30
مسقى بالآء	1206	758	1035	690	517	340	16
مسقى بالآء	641	407	428	248	380	183	17
بالزيت	1138	724	1020	586	517	330	14

الخصائص العامة للفلاد الخلاقى والكربونى /تابع/

الامدن	المقاومة النهائية	إجهاد الخضوع MN/m ²	حد التحمل في حالة الإجهاد المكرر		رقم قساوة برينر	معامل المرونة		ملاحظات والاستخدام المقترح		
			قصر MN/m ²	شد MN/m ²		قصر GN/m ²	شد وضغط GN/m ²			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
سقي بلريت S.A.E. 4140.	828 1310	621	690	380	414	240	207	82	25	
		1035	1138	628	655	380	-	-	12	
	724	517	676	373	654	220	207	82	25	
	1586	1242	1448	1448	724	425	-	-	12	
S.A.E 6145.										
سقي بلريت Silicon- manganese- S.A.E. 9260.	1090	828	690	414	428	240	207	82	16	مستات، نرايض
سقي بلريت Stainless steel.	621 1380	414	241	138	276	135	207	82	60	المنفعة على الساخن
0 12C, 180 cf. 8 0 Ni		1035	1206	690	621	380	-	-	5	العمل على البارد.

$$1 \text{ GN/m}^2 = (1000/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$$

$$1 \text{ MN/m}^2 = (1/9.80665) \text{ kgf/mm}^2$$

0 12C, 180
cr. 8.0 Ni

قيم عوامل الأمان المفضلة والموصى باستخدامها

المعدن	للحمولات الثابتة	للحمولات المتغيرة	للحمولات الصدم
حديد الزهر	5 to 6	8 to 12	16 to 20
الحديد المطاوع	4	7	10 to 50
الفولاذ	4	8	12 to 60
المخلائط والمعادن الضربة	6	9	15
الجلد	9	12	15
دعامات خشبية	7	10 to 15	20

جدول بعوامل الضرب الكبيرة والصغيرة

الرمز	التسمية	قيمة العامل
T	tera [†]	$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$
G	giga	$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$
M	mega	$1\ 000\ 000 = 10^6$
k	kilo	$1\ 000 = 10^3$
h	hecto	$100 = 10^2$
da	deca	$10 = 10^1$
d	deci	$0.1 = 10^{-1}$
c	centi	$0.01 = 10^{-2}$
m	milli	$0.001 = 10^{-3}$
μ	micro	$0.000\ 001 = 10^{-6}$
n	nano	$0.000\ 000\ 001 = 10^{-9}$
p	pico	$0.000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$
f	femto	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$
a	atto	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$

جدول المحتويات

5.....	مقدمة
7.....	1 عوامل التحويل إلى الواحدات في النظام الدولي
17	2 معادلات الستاتيك والتحرك
18	معادلات الحركة
18	رموز واصطلاحات
19	الستاتيك
32	التحرك
32	طاقة الجسم الصلب
32	الاهتزازات الحرّة للأنظمة وحيدة درجة الحرية
36	القتل
36	القتل في المحاور الدائرية المصمتة
42	إجهادات الاسطوانة
42	الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات قليلة السماكة (ذات المقاطع الصغيرة)
42	الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات ذات السماكة الكبيرة

3 معادلات الإجهادات في العناصر الميكانيكية 45

- 46 الإجهادات الناطمية والأساسية
- 46 الإجهادات الناطمية
- 47 إجهاد القص الأعظمي
- 48 تطبيق
- 50 الإجهادات الناتجة عن العناصر المتداخلة
- 53 القوى والعزوم
- 54 تجميع الأجزاء المتداخلة
- 54 معادلات الجوائز

4 المحاور ومعادلاتها 75

- 76 المحاور وأعمدة الإدارة
- 78 الانحراف الزاوي الناتج عن العزم
- 79 المحاور في حالة الانحناء
- 79 المحاور المعرضة لعزم انحناء وفتل مركبين
- 81 محاور نقل القدرة
- 85 حساءة الفتل
- 86 الجساءة الجانبية
- 87 العزوم
- 88 السرعة الحرجة

93	المعادلات التحريبية لمحاور نقل القدرة المصنوعة من الفولاذ
94	الأنظمة ذات محاور نقل القدرة المتعددة.....
94	المحاور القائدة
95	محاور المناولة العلوية.....
96	محاور إدارة متوسطة
96	المحاور الوسيطة.....
99	الحدافات على المحاور (الدولاب المعدل).....
101	المحاور العمودية الخاصة بالمزج أو أوعية الخلط.....
101	معادلة الاستطاعة بالحضان البخاري.....

5 عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية.....103

104	النوابض
104	النوابض الحلزونية
106	التحميل الجانبي لنوابض الضغط.....
110	نوابض الشد الحلزونية
112	النوابض المخروطية.....
113	النوابض الحلزونية ذات الأسلاك المربعة والمستطيلة.....
118	نوابض الفتل الحلزونية
119	النوابض ذات الأسلاك مربعة المقطع.....
120	النوابض ذات الأسلاك مستطيلة المقطع.....
121	نوابض الاستطاعة اللولبية والنوابض ثابتة القوة (NEG'ATOR)

127	نوابض الأقراص المخروطية أو نوابض Belleville
129	المعادلات الخاصة بانحراف وارتفاع المخروط الصغيرين
130	الحمل P' المطبق داخل الحواف
130	النوابض المستوية والورقية
130	نابض الدعامة البارزة البسيط — عرض ثابت
132	نابض الدعامة البارزة البسيط ذو شكل شبه المنحرف
133	النوابض المستوية المعرضة لحمولة مركبة محورية وحاجبية
135	النوابض الورقية
138	نوابض قضبان القتل
138	عموميات
138	قضيب مصمت دائري المقطع
139	قضيب مفرغ دائري المقطع
139	قضيب مربع المقطع
140	قضيب مستطيل المقطع
140	نوابض القتل المحملة بواسطة ذراع
141	النوابض المطاطية ونوابض التثبيت
142	نوابض القص أو التي على شكل شطائر
143	نوابض القص الاسطوانية
143	ارتفاع محوري ثابت
144	إجهاد ثابت
145	نوابض القتل الاسطوانية

145	ثابتة السماكة
151	السيور المسطحة (الأقشطة)
151	طول السمر
152	سرعة السمر
153	قوة الشد المؤثرة على السمر
153	الاستطاعة المنقولة
154	تصميم البكرات المصنوعة من حديد الصلب
158	السيور التي على شكل حرف V
162	السلاسل الاسطوانية الدوارة
164	السلاسل الصامتة (سلاسل ذات حلقات مفلطحة متناوبة مع مسامير الربط)
165	المكايح ذات اللقم
169	الكوابح ذات السيور
173	الفاصل الواصل
173	الفاصل الواصل القرص
174	الفاصل الواصل المخروطي
174	الفاصل الواصل ذو السمر
176	الفاصل الواصل ذو المدحرجات الاسطوانية
178	الخنوابير
181	المسننات
182	معادلات المسنن المستقيم
184	حمل القدرة — السرعة

182	متانة المسنن.....
186	الفوت (BACKLASH)
188	مرحلة التخفيض
189	المسنتات المائلة (Helical Gear)
191	المسنتات المخروطية
197	براغي ACME
198	الأعمدة في أجزاء الآلات
201	وثوقية عناصر الآلات والأنظمة
201	ملخص للمعادلات ذات الصلة بموضوع الوثوقية
207	تصميم دولاب GENEVA
207	معادلات التصميم
211	معادلات الإجهاد للأسطوانات الرقيقة
213	المعادلات التصميمية للنوابض المنحنية
216	المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة أثناء تصميم المدحرجات (البيليات)
223	المدحرجات (البيليات)
231	الدولاب المعدّل

6 معادلات تشغيل المعادن.....237

236	سرعة القَطْع
236	سرعة تغذية أداة القطع
237	المحاور المخروطية

238	آلات التفريز
240	مقدار تقدم سكين التفريز
241	عمق التفريز المطلوب لمكان توضع الخابور
242	زمن الإنتاج (التشغيل)
242	طريقة الإنتاج المثلى
243	حجم المجموعة الأصغري
243	زمن الخراطة
244	الزمن المطلوب لتبديل أدوات القطع
244	زمن إجراء الشد (الشفرة)
245	زمن خراطة الوجه
245	أبعاد اللولب المطلوبة عند تشغيل اللولب
247	عمليات تشغيل القلاووظ
248	الزمن اللازم للقلاووظ بذكور القلاووظ
249	الزمن اللازم لإجراء التفريز الجاني
249	الزمن اللازم لتبديل أداة القطع للمقشطة
249	سرعة القطع للمقشطة
250	زمن القطع على المقشطة
250	معدل التغذية للمخلخة المركزية
251	زمن التحليخ
252	زمن تفريز القلاووظ
252	الزمن اللازم للبشر

252	سرعة المشغولة وسرعة أداة قطع المسننات (التسنين).....
253	الزمن اللازم لتشغيل مسنن مستقيم.....
254	زمن تأشر (تحدد المحاور).....
255	الزمن اللازم للنشر.ممنشار المعادن.....
255	الزمن اللازم للنشر.ممنشار شريطي (شُلَّة).....
255	استطاعة المحرك المطلوبة لإنجاز عمليات القطع بالخراطة.....

7 معادلات التدفئة والتهوية والتكييف.....257

258	معادلات التكييف.....
258	قوانين المروحة.....
259	معادلات تغيير الهواء.....
259	معادلات تدفق الهواء.....
260	معادلات التسخين والتبريد بالهواء.....
262	نواتج التكييف المشكلة في مكيفات الهواء.....
262	معادلات توازن الهواء المطلوب.....
263	معادلات ترطيب الغرفة.....
264	تحديد درجة حرارة تكاثف قطرات البخار على زجاج النوافذ.....
265	معادلات خصائص الهواء في مكيفات الهواء.....
267	معادلات نظام مبرّد الماء.....
268	معادلات برج التبريد.....
269	معادلات نظام التسخين.....

269	ضياعات الضغط في أنابيب البخار
272	معادلات مستخانات الماء الساخن ذات الحجم المتري
273	استطاعة التسخين للمشعات والمبادلات
274	تقدير هواء التزويد للغرفة اعتماداً على محتوى CO_2
275	المردود واستطاعة الدخول لمروحة الهواء
277	قطر مجرى الهواء الدائري المقطع المكافئ للمجرى المستطيل
278	ضياعات الضغط في مجاري الهواء
279	الكبح الناتج عن وجود مصفاة هواء مغيرة
279	كمية الحرارة المنتقلة عبر الجدار
281	فرق درجات الحرارة الوسطي لوشائع تبريد نظام الماء المبرّد
282	مردود برج التبريد
283	معادلات التسخين وتكييف الهواء بنظام SI وUSCS
286	المعادلات التبادلية بين التدفق وانخفاض ضغط أنابيب البخار
287	معادلات نواتج التكثيف على الأنابيب
287	معادلات مردود HVAC
288	معادلات غرفة الامتصاص المكافئة لنظام HVAC
289	المعادلات البسايمكومترية
293	معادلات مزج الهواء (الهواء الخارجي والهواء المعاد)
293	معادلات حمل التبريد
294	معادلات عوامل كمية الحرارة المحسوسة
295	معادلات عامل التبريد الجائني

295	معادلات درجة الحرارة عند الأجهزة
295	معادلة درجة حرارة هواء التزويد
296	معادلات كميات الهواء
297	أمثال ثوابت الهواء
298	المعادلات في حال وجود مصائد بخار
299	عامل الأمان
300	الجزء المراد تصميمه

8 معادلات الترموديناميك 301

302	مصطلحات وتعريف
305	معادلة الطاقة العامة
306	قوانين الغازات
307	الأطوار أو العمليات المطبقة على الغازات المثالية (النامة)
310	أداء الضواغط
310	المواصفات القياسية للضواغط الأديباتية/إيزونتروبية)
311	مواصفات الضواغط المتساوي درجة الحرارة
311	مواصفات الضواغط متعددة المراحل
312	السعة
313	إزاحة المكبس
313	إزاحة المكبس
314	المردود الحجمي الظاهري

314	الاستطاعة النظرية للضواغط (KW)
315	مردود الضغط
315	الاستطاعة الفعلية hp
315	أداء المروحة
315	تعريف
316	فرق الضغط الستاتيكي والضغط الناتج عن السرعة وفرق الضغط الكلي
317	استطاعة المروحة
318	استطاعة المحور (SHP)
318	الصفات المميزة للمروحة
319	قوانين المروحة
319	مميزات الأداء للآلات المكسية
319	الضغط الفعال الوسطي
321	الاستطاعة الظاهرية
321	استطاعة المحور أو الكبج
322	ضغط الكبج الفعال الوسطي أو ضغط الكبج الوسطي
322	ضغوط الاحتكاك الوسطية
322	المردود الميكانيكي
323	الدارات الحرارية للمحرك — النظرية
323	دائرة كارنو (CARNOT)
325	دائرة أوتو (OTTO)
325	دائرة ديزل DIESEL

326	دائرة برايتون (BRAYTON).....
327	دائرة رانكين (RANKINE).....
329	المسعر الخانق (Throttling Calorimeter)
330	العنفات الغازية

9 معادلات هندسة الطاقة.....341

342	عوامل أداء منشآت الطاقة
342	أداء مولّد البخار (المرجل)
342	رموز واصطلاحات
343	كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء.....
344	قدرة مولّد البخار وكمية البخار الناتج.....
344	عامل التبخر (FE)
344	التبخير
345	مردود مولّد البخار
345	الضياعات وتوازن كمية الحرارة
346	مولّدات البخار
350	أنواع الوقود والاحتراق
350	مقدار تسخين الوقود
351	نواتج الاحتراق
351	الهواء الزائد المضاف
351	العنفات البخارية

352	معدّل الحرارة
355	معدّل البخار للدارة ذات إعادة التسخين المتجدد
357	مردود مولّد البخار التوربيني ومعدّل البخار
358	دارة المولّد التوربيني ذو الحرارة المستعادة: تحليل اختياري
360	أداء منشآت الطاقة اعتماداً على بيانات اختبار
361	المنشآت الهيدروكهربية والعنفات الهيدروليكية
361	رموز واختصارات
362	استطاعة الماء
363	السرعة النوعية
363	التكهف
363	المكثفات ذات السطوح للعنفات البخارية
365	التوازن الحراري لمولّد البخار
368	انخفاض الضغط في مجاري الهواء المستقيمة لمجاري مولّد البخار
370	الأنابيب التي على شكل U ومقاييس الضغط والسحب
370	الأنابيب التي على شكل U
371	أنبوب U التفاضلي
371	أنبوب U التفاضلي المقلوب
372	الأنابيب المغلقة التي على شكل U
372	المقاييس المضاعفة

10 معادلات خاصة بهندسة الموائع 375

- 376 الخاصة الشعرية
- 381 مدخل إلى جريان الموائع
- 383 مماثلة النماذج الفيزيائية
- 387 جريان المائع في الأنابيب
- 387 الجريان الصفحي
- 389 الجريان المضطرب
- 390 معادلة Darcy-Weisbach
- 391 معادلة Chezy
- 391 معادلة Manning
- 392 معادلة Hazen-Williams
- 394 تغيرات الضغط (الارتفاع) الناتجة عن تغير حجم الأنبوب
- 395 التوسيع المفاجئ
- 395 التوسيع المتدرج (الموسعات المتدرجة)
- 396 التضيق المفاجئ لحجم الأنبوب (التقليص المفاجئ للمقطع)
- 397 ضياعات الانحناء واللوازم القياسية
- 397 التدفق خلال التوافير
- 397 تصريف نافورة إلى الهواء الحر
- 399 التوافير المغمورة بالماء
- 400 معدل التصريف تحت ارتفاع هابط

401	نفث الموائع.....
402	تصريف النافورة إلى الأنابيب المخروطية المتباعدة.....
403	طَرَقُ الماء.....
404	إجهادات الأنبوب العمودية على المحور الطولي.....
405	التمدد الحراري للأنبوب.....
406	القوى الناتجة عن انحناءات الأنبوب.....
408	الحجم الاقتصادي للأنابيب الموزعة.....
409	تحديد القطر المناسب للأنابيب الماء والبخار.....
410	حساب التدفق عبر القياس بالفتوري.....
411	الجريان غير المنتظم في الأتية المفتوحة.....
412	الأتية مستطيلة المقطع.....
414	الأتية مثلثة المقطع.....
415	الأتية ذات المقطع على شكل قطع مكافئ.....
417	الأتية التي لها مقطع شبه منحرف.....
418	الأتية دائرية المقطع.....
419	المضخات.....
419	تعريف.....
419	قياسات الارتفاع (فرق الضغط).....
420	القدرة (الطاقة).....
421	تحديد المراتب.....
422	ارتفاع السحب.....

423	الطاقة ضمن أنظمة الضخ.....
424	فرق الارتفاع الكلي للمضخة.....
427	معادلات الاستطاعة والضغط والتدفق للمضخة.....
429	ضباغات الضغط ضمن الأنابيب والمحققات.....
429	ارتفاع السحب الموجب الصافي للمضخات الترددية.....
430	ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر.....
430	الارتفاع الناتج عن التسارع.....
434	ارتفاع السحب الموجب الصافي لمضخات الطرد المركزي.....
436	المضخات اللولبية وارتفاع الامتصاص الأعظمي.....
439	السرعة النوعية للمضخات التجارية.....
440	سرعة السحب النوعية S.....
442	تشغيل المضخات الطاردة المركزية عند معدلات تدفق منخفضة.....
443	المستخرجات (المفرغات) Eductors.....
443	مقدمة نظرية وتصميمية.....
447	تصميم محور المضخة.....
447	معيّار التصميم.....
447	إجهاد الانحناء: يمكن حساب إجهادات الفتل في المحور بتطبيق المعادلتين التاليتين:.....
448	انحراف (تشوه) المحور.....
449	حسابات استطاعة المضخة.....
449	استطاعة الخرج.....
450	استطاعة الدخل.....

450	مردود المضخة.....
450	مردود المضخة.....
451	كيف تُشكّل جداول أنابيب الفولاذ.....
452	تقدير وزن الأنبوب تبعاً لكل قدم من الطول.....
453	معادلات الجريان الصفحي والمضطرب في الأنابيب.....
453	مصطلحات ورموز.....
456	معادلات جريان الهواء ضمن الأنابيب والصمامات ولوازمها.....
456	مصطلحات ورموز.....
461	أنظمة امتصاص الهواء في محركات الاحتراق الداخلي.....
461	الأساسات لمحركات الاحتراق الداخلي.....

11 الاهتزازات.....463

464	الاهتزازات الحرة غير المتخامدة.....
466	الاهتزازات الحرة المتخامدة.....
470	الاهتزازات القسرية.....
470	أ - حل الحالة الثابتة مع تخميد لزج.....
472	ب - عدم التوازن الدوراني والترددية.....
474	ج - حالة اهتزاز القاعدة (تهييج القاعدة).....
476	د - عزل الاهتزاز.....
478	هـ - تدويم المحاور الدوارة.....
480	الاهتزازات القتلية.....

أ - نظام فيه قرصين 480

ب - نظام فيه ثلاثة أقراص 481

الملحق 483

الخواص الميكانيكية لحديد الصب مع غرافيت كروي 484

الخواص الميكانيكية لحديد الصب الرمادي 485

الخواص الميكانيكية للفولاذ ذو مقاومة الشد العالية 485

الخواص الميكانيكية والصلادة للفولاذ الكربوني المطروق

المستخدم لأهداف هندسية عامة 486

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني 487

قيم إجهادات الشد والخضوع للفولاذ الطروق القياسي 490

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي 491

الخواص الميكانيكية للفولاذ الأوستيني المنعم البنية غير القابل للصدأ

قضبان، صفائح، ألواح، شرائط 496

خصائص حديد الزهر القياسي 497

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني 498

قيم عوامل الأمان المفضلة والموصى باستخدامها 503

جدول بعوامل الضرب الكبيرة والصغيرة 503

جدول المحتويات 505

لتحميل انواع الكتب راجع: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

پدای داتلود کتابهای مختلف مراجعه: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

پژدایەزانانی چۆرەها کتێب:سەردانی: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ النِّقَافِي)

www.iqra.ahlamontada.com



www.iqra.ahlamontada.com

للکتاب (کوردی ، عربی ، فارسی)

Mechanical Engineering Portable Reference

دليل المهندس الميكانيكي

يعتبر هذا الدليل مرجعاً سهلاً يحوي آلاف المعادلات التي يحتاجها المهندس الميكانيكي في حياته العملية مجموعة في كتاب واحد، من الإجهادات إلى معادلات الاهتزازات وتصميم المخرجات والمسننات والسيور، ومعادلات هندسة الطاقة وهندسة الموائع ومعادلات التدفئة والتكييف، وهناك أيضاً معادلات تجريبية وضعها مهندسون محترفون يملكون سنوات طويلة من الخبرة والعديد من المواضيع الهندسية التي يحتاجها كل مهندس ميكانيكي أثناء عمله.

30010



3480R0430375



<http://www.raypub.com>